



UNIVERSITÉ DE  
**SHERBROOKE**

FACULTÉ DE GÉNIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

# INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET INTRINSÈQUES DU GROS GRANULAT SUR LA DURABILITÉ À L'ÉCAILLAGE DES BÉTONS

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : Génie Civil

Nicolas Le Piquet

Jury : Richard GAGNÉ (Directeur)  
Benoit Fournier (Codirecteur)  
Patrice Rivard (Rapporteur)  
Olivier Bonneau (Correcteur)  
Cédric Drolet (Correcteur)

*À ma famille et mes amis qui m'ont toujours poussé à donner le meilleur de moi-même  
dans ce que j'entreprends*

# RESUME

La durabilité des ouvrages est une question de plus en plus préoccupante avec les enjeux économiques et surtout écologiques auxquels il faut faire face aujourd'hui. L'écaillage des bétons en présence de sels déglacants est l'un des modes de dégradation les plus courants. Néanmoins après de nombreux travaux et recherches, il n'y encore pas de théorie physico-chimique unique permettant d'expliquer ce phénomène. Parmi les modes de dégradations, un paramètre encore très peu étudié est l'influence des granulats sur la formation des éclatements granulaires pouvant être engendrés lors de l'exposition du béton à des cycles de gel-dégel en présence de sels de déglacage.

Ils existent des méthodes d'essai qui permettent de caractériser les propriétés intrinsèques des granulats, mais l'interprétation des résultats est incertaine pour mieux prédire la performance à l'éclatement du granulat lorsque le béton est exposé à des conditions favorables à l'Écaillage. Cette recherche vise à mettre en relation les caractéristiques intrinsèques des granulats avec les résultats au test d'écaillage BNQ 2621-905 Annexe B (les résistances au gel-dégel non confiné et au Micro Deval et la dimension maximale du granulat). Elle vise également à déterminer l'influence du type de matrice cimentaire, la qualité du réseau d'air ou encore l'utilisation de géotextile sur la durabilité à l'écaillage du béton et à la production d'éclatement granulaire (« pop-out ») en présence de granulats de différentes natures. Pour préparer ce projet, différentes sources de granulats ont été échantillonnées, puis caractériser par les essais suivants : résistance au Micro Deval, résistance au gel-dégel non confiné, résistance à l'essai Los Angeles, résistance au  $MgSO_4$ , mesures des particules fines et une analyse pétrographique. Afin d'étudier chacun des précédents paramètres, la recherche se décompose en six phases distinctes. Dans chacune des six phases, des plaques d'écaillages ont été produites selon la norme BNQ 2621-905 Annexe B.

Les travaux réalisés au sein de ce projet ont permis de montrer qu'il est possible de quantifier les « pop-out » et dégarnissements de granulats en fonction de leurs résistances au gel-dégel non confiné et à l'abrasion selon l'essai Micro Deval. De plus, la qualité de la matrice joue un rôle très important dans la protection des granulats et permet de minimiser la masse de débris due à l'écaillage. Cependant, même si le réseau d'air joue un rôle protecteur sur la pâte de mortier, il n'a aucune influence sur la susceptibilité d'un granulat à éclater. Enfin, l'utilisation d'un géotextile lors de la production du béton ne porte aucun avantage concret sur la durabilité à l'écaillage du béton ou les éclatements des granulats.

**Mots-clés :** Durabilité des bétons, Écaillage, Granulats, Dégarnissements, Éclatements, Facteur d'espacement, Micro Deval, gel-dégel non confiné.

# Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement Richard Gagné et Olivier Bonneau pour le soutien et l'expérience qu'ils ont su m'apporter pour réaliser ce projet, ainsi que toutes les personnes du Ministère de Transport qui ont permis la réalisation et le financement de cette recherche.

Je remercie également Corentin Flauw, Josée Bilodeau, Rajko Vojnovic et Romain Julien pour leur précieuse aide lors de la phase expérimentale de ce projet.



# TABLE DES MATIERES

<b>Chapitre 1 : INTRODUCTION</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre 2 : REVUE DE LA DOCUMENTATION</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Mécanismes d'action du gel-dégel</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 Écaillage</b>	<b>17</b>
2.1.1.1 Modèle des pressions hydrauliques	19
2.1.1.2 Modèle des pressions osmotiques	20
<b>2.1.2 Paramètres influents</b>	<b>23</b>
2.1.2.1 Volume d'air/Facteur d'espacement	23
2.1.2.2 Rapport E/C	25
2.1.2.3 La fumée de silice	26
2.1.2.4 Les cendres volantes	26
2.1.2.5 Les laitiers de haut fourneau	27
<b>2.2 Les gros granulats</b>	<b>27</b>
2.2.1 Caractéristiques et définition	27
2.2.2 Influence des gros granulats sur l'écaillage	28
<b>2.3 Essais et normes</b>	<b>32</b>
2.3.1 L'essai Micro Deval	32
2.3.2 L'essai de gel-dégel non confiné	39
2.3.3 Une combinaison de l'essai Micro Deval et de l'essai de gel-dégel non confiné	44
2.3.5 Exigences normatives pour les propriétés physiques des gros granulats	48
<b>Chapitre 3 : BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL</b>	<b>53</b>
<b>3.1 Contexte global du projet et problématique</b>	<b>53</b>
<b>3.2 Objectifs</b>	<b>54</b>
<b>3.3 Méthodologie</b>	<b>55</b>
3.3.1 Échantillonnage des granulats	56
3.3.2 Caractérisation des sources granulaires	56
3.3.3 Phase 1 : béton de type V-S avec granulats 5-20 mm	57
3.3.4 Phase 2 : béton de type V-S avec granulats 5-14 mm	59
3.3.5 Phase 3 : béton de type XIII avec granulats 5-14 mm	60
3.3.6 Phase 4 : béton de classe F2 avec granulats 5-20 mm	61
3.3.7 Phase 5 : Influence du facteur d'espacement (Béton V-S)	61
3.3.8 Phase 6 : Influence du géotextile (bétons de classe C2)	62
<b>Chapitre 4 : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES</b>	<b>65</b>
<b>4.1 Gros granulats</b>	<b>65</b>
4.1.1 Source 1	66
4.1.2 Source 2	68
4.1.3 Source 3	70
4.1.4 Source 8	72
4.1.5 Source 11	75
4.1.6 Source 12	77
4.1.7 Source 14	79
4.1.8 Source granulaire disponible à l'Université de Sherbrooke	81
4.1.9 Caractérisation des éclatements et des dégarnissements	82
<b>4.2 Granulats fins</b>	<b>89</b>

<b>4.3</b>	<b>Liants .....</b>	<b>90</b>
<b>4.4</b>	<b>Adjuvants .....</b>	<b>90</b>
<b>4.5</b>	<b>Mélanges et procédures .....</b>	<b>90</b>
4.5.1	Procédure de gâchage.....	90
4.5.2	Échantillonnage .....	91
4.5.3	Mûrissement .....	92
4.5.4	Formulations.....	92
4.5.4.1	Phase 1 : bétons de type V-S avec granulats 5-20 mm .....	92
4.5.4.2	Phase 2 : béton de type V-S avec granulats 5-14 mm.....	93
4.5.4.3	Phase 3 : béton de type XIII avec granulats 5-14 mm .....	94
4.5.4.4	Phase 4 : béton de classe F2 avec granulats 5-20 mm .....	95
4.5.4.5	Phase 5 : Influence du facteur d'espacement (Béton V-S) .....	96
4.5.4.6	Phase 6 : influence du géotextile (bétons de classe C2) .....	97
<b>Chapitre 5 : RÉSULTATS.....</b>		<b>99</b>
<b>5.1</b>	<b>Caractérisation des sources granulaires .....</b>	<b>99</b>
<b>5.2</b>	<b>Relation entre certaines caractéristiques intrinsèques du granulat et la résistance à l'écaillage – Phase 1 .....</b>	<b>104</b>
5.2.1	Résistance à la compression .....	104
5.2.2	Durabilité à l'écaillage.....	105
5.2.3	Dégarnissement et éclatement des granulats .....	108
<b>5.3</b>	<b>Influence de la dimension maximale du gros granulat sur la susceptibilité à l'éclatement / dégarnissement – Phase 2 .....</b>	<b>112</b>
5.3.1	Résistance à la compression .....	112
5.3.2	Durabilité à l'écaillage.....	113
5.3.3	Dégarnissement et éclatement des granulats .....	114
<b>5.4</b>	<b>Influence d'une matrice de béton à haute performance (XIII) sur la susceptibilité à l'éclatement / dégarnissement – Phase 3 .....</b>	<b>116</b>
5.4.1	Résistance à la compression .....	116
5.4.2	Durabilité à l'écaillage.....	116
5.4.3	Dégarnissement et éclatement des granulats .....	117
<b>5.5</b>	<b>Influence d'une matrice de béton de faible performance (F2) sur la susceptibilité à l'éclatement / dégarnissement – Phase 4 .....</b>	<b>119</b>
5.5.1	Résistance à la compression .....	119
5.5.2	Durabilité à l'écaillage.....	119
5.5.3	Dégarnissement et éclatement des granulats .....	120
<b>5.6</b>	<b>Influence d'une variation des caractéristiques du réseau d'air sur la susceptibilité à l'éclatement / dégarnissement – Phase 5 .....</b>	<b>122</b>
5.6.1	Résistance à la compression .....	122
5.6.2	Durabilité à l'écaillage.....	122
5.6.3	Dégarnissement et éclatement des granulats .....	123
<b>5.7</b>	<b>Influence du géotextile sur la résistance à l'écaillage d'un béton de classe C2 – Phase 6 .....</b>	<b>125</b>
5.7.1	Résistance à la compression .....	125
5.7.2	Durabilité à l'écaillage.....	126
5.7.3	Dégarnissement et éclatement des granulats .....	127

<b>Chapitre 6 : ANALYSE GÉNÉRALE INTERPHASE.....</b>	<b>129</b>
<b>6.1 Emplacement dans la chambre froide.....</b>	<b>129</b>
<b>6.2 Étude de la relation entre les débris massiques et les caractéristiques d'un granulat .....</b>	<b>129</b>
6.2.1 Estimation de la masse des débris associée à l'endommagement spécifique du gros granulates .....	132
<b>6.3 Corrélation entre les éclatements et les dégarnissements et les caractéristiques d'un granulat .....</b>	<b>138</b>
<b>6.4 Influence de la dimension maximale du gros granulat .....</b>	<b>143</b>
<b>6.5 Influence de la qualité de la matrice cimentaire.....</b>	<b>145</b>
<b>6.6 Influence de la qualité du <math>L</math> .....</b>	<b>149</b>
<b>6.7 Influence de l'utilisation d'un géotextile .....</b>	<b>150</b>
<b>6.8 Suivi photographique de l'état de surface des plaques d'écaillage.....</b>	<b>152</b>
<b>Chapitre 7 : CONCLUSIONS.....</b>	<b>155</b>
<b>Chapitre 8 : Références.....</b>	<b>158</b>
<b>Chapitre 9 Annexes.....</b>	<b>162</b>

# LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 - EXEMPLE DE TERRASSE EN BÉTON PRÉSENTANT DES DÉGRADATIONS PAR ÉCAILLAGE .....	18
FIGURE 2.2 - EXEMPLE DE PLAQUE D'ÉCAILLAGE DÉGRADÉE EN CONDITIONS DE LABORATOIRE.....	19
FIGURE 2.3 - DISTANCE <b>2L</b> SÉPARANT DEUX BULLES D'AIR [1] .....	20
FIGURE 2.4 – REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU MODÈLE DES PRESSIONS OSMOTIQUES [1] .....	21
FIGURE 2.5 – INFLUENCE DE LA CONCENTRATION EN SEL SUR LA DÉGRADATION À L'ÉCAILLAGE [1] .....	22
FIGURE 2.6 - PRESSION INTERNE AU BÉTON EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN NaCl [6].....	23
FIGURE 2.7 - INFLUENCE DU VOLUME D'AIR ENTRAÎNÉ ET DU TYPE D'AGENT ENTRAÎNEUR D'AIR [7] .....	24
FIGURE 2.8 – INFLUENCE DU FACTEUR D'ESPACEMENT SUR LA RÉSISTANCE À L'ÉCAILLAGE (E/C DE 0,43 À 0,47) [7] .....	25
FIGURE 2.9 - COMBINAISONS DU VOLUME TOTAL DES PORES ET DU DIAMÈTRE MÉDIAN DES PORES POUR DES GRANULATS DURABLES ET NON-DURABLES [4].....	29
FIGURE 2.10 - FISSURATION D'UN GRANULAT DANS UN BÉTON EXPOSÉ AU GEL [1] .....	30
FIGURE 2.11 - INFLUENCE DU GROS GRANULAT MARGINAL SUR LA MASSE DE DÉBRIS EN FONCTION DE TROIS TYPES DE COMPARAISONS PAR RAPPORT AU GRANULAT DE RÉFÉRENCE [19] .....	31
FIGURE 2.12 - COMPARAISONS DES SURFACES DE GRANULATS ÉCLATÉS LORS DE L'ÉCAILLAGE POUR LES DEUX GRANULATS [19].....	32
FIGURE 2.13 - APPAREIL MICRO DEVAL [19] .....	34
FIGURE 2.14 - CORRÉLATION ENTRE L'ESSAI MICRO DEVAL ET L'ESSAI DE DURABILITÉ AU SULFATE DE MAGNÉSIUM [21].....	35
FIGURE 2.15 - CHAMP DES INDICES DE PERFORMANCE DES GRANULATS EN FONCTION DU NOMBRE PÉTROGRAPHIQUE ET DE LA PERTE MASSIQUE À L'ESSAI MICRO DEVAL [21] .....	36
FIGURE 2.16 - RÉSULTATS INTER-LABORATOIRES DES ESSAIS DE DURABILITÉ AU SULFATE DE MAGNÉSIUM [22].....	37
FIGURE 2.17 - RÉSULTATS INTER-LABORATOIRES DES ESSAIS MICRO DEVAL POUR DES GROS GRANULATS [22] .....	37
FIGURE 2.18 - PERTE À L'ESSAI MICRO DEVAL EN FONCTION DU MODULE DE FINESSE [23].....	38
FIGURE 2.19 - ÉCHANTILLON DE GEL-DÉGEL NON CONFINÉ [19] .....	40
FIGURE 2.20 - PERTE MASSIQUE AU GEL-DÉGEL EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE DU CONGÉLATEUR [25].....	43
FIGURE 2.21 - PERTE MASSIQUE DUE AU TEST DE DURABILITÉ AU SULFATE DE MAGNÉSIUM EN FONCTION DE LA PERTE AU GEL-DÉGEL [25].....	43
FIGURE 2.22 - PRÉSENCE DE FEUILLETS EN SURFACE DUE À UN « POP-OUT » [19] .....	47
FIGURE 2.23 - FRACTURE VISIBLE D'UN GRANULAT [19] .....	47
FIGURE 2.24 - CÔNE DE PÂTE DÉTACHÉE ET FRACTURE VISIBLE À LA SURFACE DU GRANULAT [19] .....	48
FIGURE 3.1 RÉSUMÉ DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL DES SIX PHASES DE RECHERCHE .....	64
FIGURE 4.1 - ÉCHANTILLON DE LA SOURCE 1, FRACTION 10 - 14 MM [28].....	66
FIGURE 4.2 - ÉCHANTILLON DE LA SOURCE 2, FRACTION 10 - 14 MM [28].....	68
FIGURE 4.3 - ÉCHANTILLON DE LA SOURCE 3, FRACTION 10 - 14 MM [28].....	70
FIGURE 4.4 - ÉCHANTILLON DE LA SOURCE 8, FRACTION 10 -14 MM [28] .....	72
FIGURE 4.5 - ÉCHANTILLON DE LA SOURCE 11, FRACTION 10 - 14 MM [28].....	75
FIGURE 4.6 - ÉCHANTILLON DE LA SOURCE 12, FRACTION 10 - 14 MM [28].....	77
FIGURE 4.7 - ÉCHANTILLON DE LA SOURCE 14, FRACTION 10 - 14 MM [28].....	79
FIGURE 4.8 – EXEMPLE DU DÉGARNISSEMENT D'UNE PARTICULE DU GROS GRANULAT SANS ÉCLATEMENT ..	82
FIGURE 4.9 - EXEMPLE DE DÉGARNISSEMENT (CERCLE ROUGE) ÉTANT APPARU AVANT L'ÉCLATEMENT (CERCLE NOIR) D'UNE PARTICULE DU GROS GRANULAT .....	83
FIGURE 4.10 - EXEMPLES DE DIFFÉRENTS ÉCLATEMENTS SUSCEPTIBLES D'APPARAÎTRE LORS DE L'ESSAI DE RÉSISTANCE À L'ÉCAILLAGE RÉALISÉ EN LABORATOIRE .....	84
FIGURE 4.11 - EXEMPLE DE RELEVÉ DE « POP-OUT » ET DE DÉGARNISSEMENTS SUR UN ACÉTATE .....	85

FIGURE 4.12 - EXEMPLE DU SCAN D'UN ACÉTATE SUITE AU RELEVÉ DES ÉCLATEMENTS ET DÉGARNISSEMENTS.....	86
FIGURE 4.13 - EXEMPLE DE SORTIE DE LA MACRO « SURF_ECLAT ».....	88
FIGURE 4.14 - EXEMPLE DE SORTIE DE LA MACRO « SURF_TOTALE » .....	89
FIGURE 5.1 - RÉSUMÉ DES ESSAIS DE GEL-DÉGEL ET MICRO DEVAL.....	103
FIGURE 5.2 - RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS DE LA PHASE 1 .....	104
FIGURE 5.3 - CORRÉLATION ENTRE LA VARIATION DES RÉSISTANCES À LA COMPRESSION ET DES TENEURS EN AIR DES BÉTONS DE LA PHASE 1.....	105
FIGURE 5.4 - RÉSULTATS MOYENS DES DÉBRIS MASSIQUES À 56 CYCLES EN FONCTION DE LA SOURCE GRANULAIRE ET DE L'EMPLACEMENT DANS LA CHAMBRE FROIDE .....	108
FIGURE 5.5 - POURCENTAGE DE SURFACE ÉCLATÉE DES BÉTONS DE LA PHASE 1 .....	109
FIGURE 5.6 - POURCENTAGE DE SURFACE DÉGARNIE DES BÉTONS DE LA PHASE 1 .....	109
FIGURE 5.7 - ÉVOLUTION DES SURFACES D'ÉCLATEMENT ET DE DÉGARNISSEMENT EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES DE GEL-DÉGEL DES PLAQUES COMPORTANT LE GRANULAT DE LA SOURCE 12 (CATÉGORIE 1) .....	111
FIGURE 5.8 - ÉVOLUTION DES SURFACES D'ÉCLATEMENT ET DE DÉGARNISSEMENT EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES DE GEL-DÉGEL DES PLAQUES COMPORTANT LE GRANULAT DE LA SOURCE 3 (CATÉGORIE 2) .....	111
FIGURE 5.9 - ÉVOLUTION DES SURFACES D'ÉCLATEMENT ET DE DÉGARNISSEMENT EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES DE GEL-DÉGEL DES PLAQUES COMPORTANT LE GRANULAT DE LA SOURCE 8 (CATÉGORIE 3) .....	112
FIGURE 5.10 - RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS DE LA PHASE 2 .....	113
FIGURE 5.11 - CORRÉLATION ENTRE LA VARIATION DES VALEURS DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION ET DES TENEURS EN AIR DES BÉTONS DE LA PHASE 2.....	113
FIGURE 5.12 - POURCENTAGE DE SURFACE ÉCLATÉE DES BÉTONS DE LA PHASE 2.....	115
FIGURE 5.13 - POURCENTAGE DE SURFACE DÉGARNIE DES BÉTONS DE LA PHASE 2.....	115
FIGURE 5.14 - RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS DE LA PHASE 3 .....	116
FIGURE 5.15 - POURCENTAGE DE SURFACE ÉCLATÉE DES BÉTONS DE LA PHASE 3.....	118
FIGURE 5.16 - POURCENTAGE DE SURFACE DÉGARNIE DES BÉTONS DE LA PHASE 3.....	118
FIGURE 5.17 - RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS DE LA PHASE 4 .....	119
FIGURE 5.18 - POURCENTAGE DE SURFACE ÉCLATÉE DES BÉTONS DE LA PHASE 4.....	121
FIGURE 5.19 - POURCENTAGE DE SURFACE DÉGARNIE DES BÉTONS DE LA PHASE 4.....	121
FIGURE 5.20 - RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS DE LA PHASE 5 .....	122
FIGURE 5.21 - POURCENTAGE DE SURFACE ÉCLATÉE DES BÉTONS DE LA PHASE 5.....	124
FIGURE 5.22 - POURCENTAGE DE SURFACE DÉGARNIE DES BÉTONS DE LA PHASE 5.....	125
FIGURE 5.23 - RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS DE LA PHASE 6 .....	126
FIGURE 5.24 - POURCENTAGE DE SURFACE ÉCLATÉE DES BÉTONS DE LA PHASE 6.....	127
FIGURE 5.25 - POURCENTAGE DE SURFACE DÉGARNIE DES BÉTONS DE LA PHASE 6.....	128
FIGURE 6.1 - DÉBRIS MASSIQUE À 56 CYCLES EN FONCTION DE LA SOURCE GRANULAIRE .....	130
FIGURE 6.2 - PERTE MASSIQUE À L'ÉCAILLAGE EN FONCTION DE LA RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL NON CONFINÉ .....	131
FIGURE 6.3 - PERTE MASSIQUE À L'ÉCAILLAGE EN FONCTION DE LA RÉSISTANCE AU MICRO DEVAL .....	132
FIGURE 6.4 - EXEMPLE DE DÉBRIS MASSIQUES À L'ÉCAILLAGE OBTENUS APRÈS 56 CYCLES DE GEL-DÉGEL (SOURCE 8, PHASE 4).....	133
FIGURE 6.5 - EXEMPLE DE DÉBRIS MASSIQUE À L'ESSAI D'ÉCAILLAGE RETENU AU TAMIS 5 MM, 2,5 MM, 1,25 MM, 630 µM ET AU PLAT .....	134
FIGURE 6.6 - SCHÉMA EXPLICATIF DE L'ÉPAISSEUR THÉORIQUE D'UN FLOCON D'ÉCLATEMENT .....	135
FIGURE 6.7 - CORRÉLATION ENTRE LES ÉCLATEMENTS ET DÉGARNISSEMENTS (G/M <sup>2</sup> ) AVEC LA SOMME DES PERTES MASSIQUES AU GEL-DÉGEL NON CONFINÉ ET MICRO DEVAL .....	137
FIGURE 6.8 - CORRÉLATION ENTRE LA SURFACE D'ÉCLATEMENTS ET LA RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL NON CONFINÉ .....	140
FIGURE 6.9 - CORRÉLATION ENTRE LA SURFACE DE DÉGARNISSEMENTS ET LA RÉSISTANCE AU MICRO DEVAL .....	140

FIGURE 6.10 - CORRÉLATION ENTRE LA SOMME DES SURFACES D'ÉCLATEMENTS ET DÉGARNISSEMENTS ET LA SOMME DES RÉSISTANCES AU GEL-DÉGEL NON CONFINÉ ET AU MICRO DEVAL .....	141
FIGURE 6.11 - EXEMPLES DE PLAQUES PRÉSENTANT : A) BEAUCOUP DE DÉGARNISSEMENTS; B) BEAUCOUP D'ÉCLATEMENTS; C) BEAUCOUP DE DÉGARNISSEMENTS ET D'ÉCLATEMENTS .....	142
FIGURE 6.12 - DÉBRIS MASSIQUE À 56 CYCLES EN FONCTION DE LA SOURCE GRANULAIRE ET DU CALIBRE UTILISÉ .....	143
FIGURE 6.13 - SURFACE DE DÉGARNISSEMENT À 56 CYCLES EN FONCTION DE LA SOURCE GRANULAIRE ET DU CALIBRE DE GRANULAT .....	144
FIGURE 6.14 - SURFACE D'ÉCLATEMENT À 56 CYCLES EN FONCTION DE LA SOURCE GRANULAIRE ET DU CALIBRE DE GRANULAT .....	144
FIGURE 6.15 - DÉBRIS MASSIQUE À 56 CYCLES EN FONCTION DE LA SOURCE GRANULAIRE ET DE LA MATRICE CIMENTAIRE .....	146
FIGURE 6.16 - SURFACE DE DÉGARNISSEMENTS EN FONCTION DE LA SOURCE GRANULAIRE ET DU TYPE DE MATRICE CIMENTAIRE .....	147
FIGURE 6.17 - SURFACE D'ÉCLATEMENTS EN FONCTION DE LA SOURCE GRANULAIRE ET DU TYPE DE MATRICE CIMENTAIRE .....	148
FIGURE 6.18 - DÉBRIS MASSIQUE À 56 CYCLES EN FOCNTION DU FACTEUR D'ESPACEMENT .....	149
FIGURE 6.19 - DÉBRIS MASSIQUE À 56 CYCLES EN FONCTION DU FACTEUR D'ESPACEMENT ET DU GÉOTEXTILE (GTX) .....	151
FIGURE 9.1 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 1 – PLAQUE A1 .....	175
FIGURE 9.2 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 1 – PLAQUE A2 .....	175
FIGURE 9.3 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 1 – PLAQUE B1 .....	176
FIGURE 9.4 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 1 – PLAQUE B2 .....	176
FIGURE 9.5 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 1 – PLAQUE C1 .....	177
FIGURE 9.6 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 1 – PLAQUE C2 .....	177
FIGURE 9.7 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 2 – PLAQUE A1 .....	178
FIGURE 9.8 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 2 – PLAQUE A2 .....	178
FIGURE 9.9 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 2 – PLAQUE B1 .....	179
FIGURE 9.10 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 2 – PLAQUE B2 .....	179
FIGURE 9.11 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 2 – PLAQUE C1 .....	180
FIGURE 9.12 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 2 – PLAQUE C2 .....	180
FIGURE 9.13 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 3 – PLAQUE A1 .....	181
FIGURE 9.14 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 3 – PLAQUE A2 .....	181
FIGURE 9.15 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 3 – PLAQUE B1 .....	182
FIGURE 9.16 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 3 – PLAQUE B2 .....	182
FIGURE 9.17 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 3 – PLAQUE C1 .....	183
FIGURE 9.18 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 3 – PLAQUE C2 .....	183
FIGURE 9.19 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 8 – PLAQUE A1 .....	184
FIGURE 9.20 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 8 – PLAQUE A2 .....	184
FIGURE 9.21 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 8 – PLAQUE B1 .....	185
FIGURE 9.22 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 8 – PLAQUE B2 .....	185
FIGURE 9.23 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 8 – PLAQUE C1 .....	186
FIGURE 9.24 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 8 – PLAQUE C2 .....	186
FIGURE 9.25 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 11 – PLAQUE A1 .....	187
FIGURE 9.26 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 11 – PLAQUE A2 .....	187
FIGURE 9.27 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 11 – PLAQUE B1 .....	188
FIGURE 9.28 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 11 – PLAQUE B2 .....	188
FIGURE 9.29 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 11 – PLAQUE C1 .....	189
FIGURE 9.30 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 11 – PLAQUE C2 .....	189
FIGURE 9.31 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 12 – PLAQUE A1 .....	190
FIGURE 9.32 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 12 – PLAQUE A2 .....	190
FIGURE 9.33 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 12 – PLAQUE B1 .....	191
FIGURE 9.34 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 12 – PLAQUE B2 .....	191

FIGURE 9.35 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 12 – PLAQUE C1 .....	192
FIGURE 9.36 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 12 – PLAQUE C2 .....	192
FIGURE 9.37 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 14 – PLAQUE A1 .....	193
FIGURE 9.38 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 14 – PLAQUE A2 .....	193
FIGURE 9.39 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 14 – PLAQUE B1 .....	194
FIGURE 9.40 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 14 – PLAQUE B2 .....	194
FIGURE 9.41 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 14 – PLAQUE C1 .....	195
FIGURE 9.42 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 1 – SOURCE 14 – PLAQUE C2 .....	195
FIGURE 9.43 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 2 – SOURCE 1 – PLAQUE A.....	199
FIGURE 9.44 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 2 – SOURCE 1 – PLAQUE B.....	199
FIGURE 9.45 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 2 – SOURCE 3 – PLAQUE A.....	200
FIGURE 9.46 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 2 – SOURCE 3 – PLAQUE B.....	200
FIGURE 9.47 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 2 – SOURCE 8 – PLAQUE A.....	201
FIGURE 9.48 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 2 – SOURCE 8 – PLAQUE B.....	201
FIGURE 9.49 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 2 – SOURCE 11 – PLAQUE A.....	202
FIGURE 9.50 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 2 – SOURCE 11 – PLAQUE B.....	202
FIGURE 9.51 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 3 – SOURCE 1 – PLAQUE A.....	205
FIGURE 9.52 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 3 – SOURCE 1 – PLAQUE B.....	205
FIGURE 9.53 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 3 – SOURCE 8 – PLAQUE A.....	206
FIGURE 9.54 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 3 – SOURCE 8 – PLAQUE B.....	206
FIGURE 9.55 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 4 – SOURCE 1 – PLAQUE A.....	209
FIGURE 9.56 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 4 – SOURCE 1 – PLAQUE B.....	209
FIGURE 9.57 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 4 – SOURCE 8 – PLAQUE A.....	210
FIGURE 9.58 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 4 – SOURCE 8 – PLAQUE B.....	210
FIGURE 9.59 - ÉTAT DE SURFACE À 51 CYCLES – PHASE 5 – SOURCE 11 – 224 $\mu\text{M}$ – PLAQUE A .....	213
FIGURE 9.60 - ÉTAT DE SURFACE À 51 CYCLES – PHASE 5 – SOURCE 11 – 224 $\mu\text{M}$ – PLAQUE B.....	213
FIGURE 9.61 - ÉTAT DE SURFACE À 51 CYCLES – PHASE 5 – SOURCE 11 – 173 $\mu\text{M}$ – PLAQUE A .....	214
FIGURE 9.62 - ÉTAT DE SURFACE À 51 CYCLES – PHASE 5 – SOURCE 11 – 173 $\mu\text{M}$ – PLAQUE B.....	214
FIGURE 9.63 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 6 - SANS GÉOTEXTILE – 230 $\mu\text{M}$ – PLAQUE A .....	218
FIGURE 9.64 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 6 - SANS GÉOTEXTILE – 230 $\mu\text{M}$ – PLAQUE B .....	218
FIGURE 9.65 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 6 - AVEC GÉOTEXTILE – 230 $\mu\text{M}$ – PLAQUE A.....	219
FIGURE 9.66 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 6 - AVEC GÉOTEXTILE – 230 $\mu\text{M}$ – PLAQUE B.....	219
FIGURE 9.67 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 6 - SANS GÉOTEXTILE – 191 $\mu\text{M}$ – PLAQUE A .....	220
FIGURE 9.68 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 6 - SANS GÉOTEXTILE – 191 $\mu\text{M}$ – PLAQUE B .....	220
FIGURE 9.69 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 6 - AVEC GÉOTEXTILE – 191 $\mu\text{M}$ – PLAQUE A.....	221
FIGURE 9.70 - ÉTAT DE SURFACE À 56 CYCLES – PHASE 6 - AVEC GÉOTEXTILE – 191 $\mu\text{M}$ – PLAQUE B.....	221

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 - DIMENSION NOMINALE MAXIMALE DU GRANULAT DE 10 MM [20] .....	32
TABLEAU 2.2 - DIMENSION NOMINALE MAXIMALE DU GRANULAT DE 14 MM [20] .....	33
TABLEAU 2.3 - DIMENSION NOMINALE MAXIMALE DU GRANULAT DE 20 MM [20] .....	33
TABLEAU 2.4 - VARIATION DES ESSAIS D'ABRASION MICRO DEVAL INTER-LABORATOIRES [22] .....	38
TABLEAU 2.5 - MASSE MINIMALE DES ÉCHANTILLONS D'ESSAI [24] .....	39
TABLEAU 2.6 - EXEMPLE DE LA PERTE DE MASSE PONDÉRÉE [24] .....	41
TABLEAU 2.7 - PERTE MASSIQUE AU GEL-DÉGEL APRÈS 5 CYCLES [25] .....	42
TABLEAU 2.8 – CARACTÉRISTIQUE D'UNE SURFACE ÉCAILLÉE – MORTIER DE SURFACE [27] .....	46
TABLEAU 2.9 - LIMITES DE SUBSTANCES NUISIBLES* ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GRANULATS [20] [24] .....	50
TABLEAU 2.10 - CARACTÉRISTIQUE D'UNE SURFACE ÉCAILLÉE - CÔNE D'ÉCLATEMENT [27] .....	52
TABLEAU 3.1 – CARACTÉRISTIQUES DE FORMULATION DES BÉTONS DE TYPE V-S DE LA PHASE 1 .....	58
TABLEAU 3.2 – CARACTÉRISTIQUES DE FORMULATION DES BÉTONS DE TYPE V-S DE LA PHASE 2 .....	59
TABLEAU 3.3 – CARACTÉRISTIQUES DE FORMULATION DES BÉTONS DE TYPE XIII DE LA PHASE 3 .....	60
TABLEAU 3.4 – CARACTÉRISTIQUES DE FORMULATION DES BÉTONS DE CLASSE F2 DE LA PHASE 4 .....	61
TABLEAU 3.5 – CARACTÉRISTIQUES DE FORMULATION DES BÉTONS DE TYPE V-S DE LA PHASE 5 .....	62
TABLEAU 3.6 – CARACTÉRISTIQUES DE FORMULATION DES BÉTONS DE CLASSE C2 DE LA PHASE 6 .....	63
TABLEAU 4.1 - GRANULOMÉTRIE, DENSITÉ ET ABSORPTION DE LA PIERRE 1 .....	67
TABLEAU 4.2 - RÉSULTATS DE L'ESSAI MICRO DEVAL DE LA PIERRE 1 .....	67
TABLEAU 4.3 - RÉSULTATS À L'ESSAI DE GEL-DÉGEL NON CONFINÉ DE LA PIERRE 1 .....	67
TABLEAU 4.4 - GRANULOMÉTRIE, DENSITÉ ET ABSORPTION DE LA PIERRE 2 .....	69
TABLEAU 4.5 - RÉSULTATS DE L'ESSAI MICRO DEVAL DE LA PIERRE 2 .....	69
TABLEAU 4.6 - RÉSULTATS À L'ESSAI DE GEL-DÉGEL NON CONFINÉ DE LA PIERRE 2 .....	70
TABLEAU 4.7 - GRANULOMÉTRIE, DENSITÉ ET ABSORPTION DE LA PIERRE 3 .....	71
TABLEAU 4.8 - RÉSULTATS DE L'ESSAI MICRO DEVAL DE LA PIERRE 3 .....	72
TABLEAU 4.9 - RÉSULTATS À L'ESSAI DE GEL-DÉGEL NON CONFINÉ DE LA PIERRE 3 .....	72
TABLEAU 4.10 - GRANULOMÉTRIE, DENSITÉ ET ABSORPTION DE LA PIERRE 8 .....	73
TABLEAU 4.11 - RÉSULTATS DE L'ESSAI MICRO DEVAL DE LA PIERRE 8 .....	74
TABLEAU 4.12 - RÉSULTATS À L'ESSAI DE GEL-DÉGEL NON CONFINÉ DE LA PIERRE 8 .....	74
TABLEAU 4.13 - GRANULOMÉTRIE, DENSITÉ ET ABSORPTION DE LA PIERRE 11 .....	76
TABLEAU 4.14 - RÉSULTATS DE L'ESSAI MICRO DEVAL DE LA PIERRE 11 .....	76
TABLEAU 4.15 - RÉSULTATS À L'ESSAI DE GEL-DÉGEL NON CONFINÉ DE LA PIERRE 11 .....	76
TABLEAU 4.16 - GRANULOMÉTRIE, DENSITÉ ET ABSORPTION DE LA PIERRE 12 .....	78
TABLEAU 4.17 - RÉSULTATS DE L'ESSAI MICRO DEVAL DE LA PIERRE 12 .....	78
TABLEAU 4.18 - RÉSULTATS À L'ESSAI DE GEL-DÉGEL NON CONFINÉ DE LA PIERRE 12 .....	79
TABLEAU 4.19 - GRANULOMÉTRIE, DENSITÉ ET ABSORPTION DE LA PIERRE 14 .....	80
TABLEAU 4.20 - RÉSULTATS DE L'ESSAI MICRO DEVAL DE LA PIERRE 14 .....	80
TABLEAU 4.21 - RÉSULTATS À L'ESSAI DE GEL-DÉGEL NON CONFINÉ DE LA PIERRE 14 .....	81
TABLEAU 4.22 - GRANULOMÉTRIE, DENSITÉ SSS ET ABSORPTION DU GRANULAT DE L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE .....	81
TABLEAU 4.23 - GRANULOMÉTRIE, MODULE DE FINESSE, DENSITÉ SSS ET ABSORPTION DU GRANULAT FIN UTILISÉ .....	90
TABLEAU 4.24 - FORMULATIONS DES BÉTONS DE LA PHASE 1 .....	93
TABLEAU 4.25 - FORMULATIONS DES BÉTONS DE LA PHASE 2 .....	94
TABLEAU 4.26 - FORMULATIONS DES BÉTONS DE LA PHASE 3 .....	95
TABLEAU 4.27 - FORMULATIONS DES BÉTONS DE LA PHASE 4 .....	96
TABLEAU 4.28 - FORMULATIONS DES BÉTONS DE LA PHASE 5 .....	97
TABLEAU 4.29 - FORMULATIONS DES BÉTONS DE LA PHASE 6 .....	98
TABLEAU 5.1 – CARACTÉRISATION COMPLÈTE SELON LE TABLEAU 12 DE LA NORME CSA A23.1 DES SOURCES GRANULAIRES ÉTUDIÉES .....	102



TABLEAU 5.2 - MASSE DE DÉBRIS APRÈS 56 CYCLES DE GEL- DÉGEL DES BÉTONS DE LA PHASE 1.....	107
TABLEAU 5.3 - MASSE DE DÉBRIS APRÈS 56 CYCLES DE GEL- DÉGEL DES BÉTONS DE LA PHASE 2.....	114
TABLEAU 5.4 - MASSE DE DÉBRIS APRÈS 56 CYCLES DE GEL- DÉGEL DES BÉTONS DE LA PHASE 3.....	117
TABLEAU 5.5 - MASSE DE DÉBRIS APRÈS 56 CYCLES DE GEL- DÉGEL DES BÉTONS DE LA PHASE 4.....	120
TABLEAU 5.6 - MASSE DE DÉBRIS APRÈS 51 CYCLES DE GEL- DÉGEL DES BÉTONS DE LA PHASE 5.....	123
TABLEAU 5.7 - MASSE DE DÉBRIS APRÈS 51 CYCLES DE GEL- DÉGEL DES BÉTONS DE LA PHASE 6.....	127
TABLEAU 6.1 - MASSES DE DÉBRIS ESTIMÉES .....	136
TABLEAU 6.2 - TABLEAU COMPARATIF DES SCANS ET PHOTOS DES PLAQUES D'ÉCAILLAGES .....	153

# LEXIQUE

Terme technique	Définition
Éclatement d'un granulat (pop-out)	Destruction d'un granulat au gel-dégel par éclatement
Facteur d'espacement, $\bar{L}$	Demi-distance moyenne entre deux bulles d'air adjacentes

# LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
$\alpha$	Surface spécifique des bulles d'air, (mm <sup>-1</sup> )
$\bar{L}$	Facteur d'espacement des bulles d'air, (μm)

# ACRONYMES

Terme technique	Définition
ASTM	American Standard for Testing Materials
BNQ	Bureau de Normalisation du Québec
CSA	Canadian Standards Association (Association Canadienne de Normalisation)
E/C	Rapport Eau-Ciment
E/L	Rapport Eau-Liants
AEA	Agent Entraîneur d’Air
BHP	Béton à Haute Performance
CH	Hydroxyde de Calcium, Portlandite
C-S-H	Silicate de Calcium Hydraté
MTQ	Ministère des Transports du Québec
GU	General Use (Usage Générique)
SP	Super-plastifiant
SSS	Saturé Surface Sèche
NP	Nombre Pétrographique

# Chapitre 1 : INTRODUCTION

Au Québec et plus généralement au Canada, les conditions climatiques et météorologiques mettent à l'épreuve les ouvrages extérieurs. Les températures pouvant atteindre les  $-30^{\circ}\text{C}$  au thermomètre entraînent un gel en surface ce qui est nocif pour la durabilité d'un béton. En découlent plusieurs phénomènes problématiques, dont fait partie l'écaillage. Il se traduit par l'effritement de la surface en écailles ou flocons de petites dimensions. L'utilisation de sels déglaçants pour traiter le gel des structures est fortement liée au processus d'écaillage. Ce processus de destruction est très courant dans les régions rencontrant des cycles de gel-dégel comme au Canada. En plus d'un effritement en forme de flocons du béton, des cratères peuvent apparaître. Ces cratères sont principalement dus à l'éclatement des granulats proches de la surface. L'écaillage peut être couramment observé sur des structures en béton tels les ponts, les viaducs ou encore les trottoirs.

Il est à noter que l'écaillage des surfaces de béton ne dégrade principalement que l'aspect esthétique des ouvrages. Il n'y a que très rarement des problèmes structurels découlant de l'écaillage de la surface du béton. Cependant, selon sa sévérité, il peut contribuer à la corrosion des barres d'armature en diminuant l'épaisseur de recouvrement de ces dernières. Depuis plusieurs décennies, de nombreux chercheurs ont entrepris de comprendre et expliquer ce phénomène. Cependant, il est encore aujourd'hui difficile de le définir avec exactitude. L'écaillage a pu être relié à plusieurs facteurs mais aucun ne permet de comprendre tous les paramètres influençant le processus.

Plusieurs essais et méthodes ont été établis pour quantifier les risques d'écaillage. Il est possible d'en énumérer trois au Québec fournis par les normes ASTM C672, BNQ 2621-905 Annexe B et CSA A23.2-22C. Malgré certaines différences, ils ont pour but d'indiquer facilement et rapidement la capacité d'un béton à résister ou non à l'écaillage. Tout comme de nombreuses études sur le type de liant et le réseau d'air afin d'améliorer la qualité de la pâte de ciment hydraté ont été réalisées, il est intéressant d'étudier les caractéristiques des gros granulats qui peuvent entraîner les « pop-out » souvent présent lors de l'écaillage.

C'est ici l'objectif de ce projet de recherche, de se consacrer à l'influence des propriétés physiques, intrinsèques et les caractéristiques minéralogiques des gros granulats qui influencent le comportement au gel. De plus il est important de pouvoir réaliser une différence entre un dégarnissement de la pâte de ciment (au-dessus des particules de gros granulats) et un éclatement de gros granulats, étant la réelle source de « pop-out ». Par la suite, le programme de recherche permettra de mettre en avant les caractéristiques minéralogiques des gros granulats influençant le phénomène.

Une conséquence de cette recherche sera de pouvoir valider le comportement des granulats face au phénomène d'écaillage dans le béton de ciment grâce à une méthode d'analyse optique. Cette méthode devra pouvoir être réalisée par les producteurs de gros granulats, les entrepreneurs, les propriétaires d'ouvrages ainsi que les laboratoires. Cette recherche donne également des résultats expérimentaux qui permettront de fournir des critères de performance des granulats.

Ce document se décompose en sept chapitres. Celui-ci est le premier permettant d'introduire le sujet du projet de recherche. Le deuxième chapitre porte sur la revue de la documentation existante. Elle permet d'expliquer et de comprendre les phénomènes étudiés dans ce projet. La troisième partie détaille la méthodologie développée pour mener à bien la recherche. Elle est suivie par une présentation des matériaux et des procédures utilisés. Ensuite, les résultats obtenus lors des différents travaux expérimentaux sont exposés dans le cinquième chapitre. L'analyse de ces résultats est développée dans le chapitre 6. Enfin, le chapitre 7 permettra de conclure sur la discussion des résultats de ce projet et de poser de possibles enjeux futurs.

## Chapitre 2 : REVUE DE LA DOCUMENTATION

### 2.1 MECANISMES D’ACTION DU GEL-DEGEL

#### 2.1.1 *ÉCAILLAGE*

L’écailage fait partie, avec la fissuration interne, des deux phénomènes de dégradation du béton associés aux cycles de gel-dégel. Seul le premier mode de dégradation du béton est présenté ci-après, car le second ne concerne pas l’étude proposée dans ce mémoire. Néanmoins, il est important de préciser que l’écailage n’est pas le seul mécanisme affectant les bétons exposés aux cycles de gel-dégel.

Tout d’abord, il est important de présenter le phénomène principalement étudié dans ce document : l’écailage. Celui-ci tient son nom de la dégradation de la surface des bétons. L’écailage ne peut apparaître que sous certaines conditions environnementales : le béton doit subir des cycles de gel-dégel tout en étant en présence de sels fondants. Sans ces deux paramètres, l’écailage ne se produit généralement pas.

L’écailage se présente par un décollement de fines couches de pâte de ciment ou de mortier. L’épaisseur des débris ne dépasse pas quelques millimètres. De plus, le phénomène d’écailage ne concerne que la « peau » du béton, soit les premiers millimètres de béton sous la surface (figure 2.1). Il s’agit généralement d’un problème esthétique et non structurel. Néanmoins, dans certains cas, les dégradations dues à l’écailage sont telles qu’elles peuvent accélérer d’autres processus comme la pénétration d’ions susceptibles de corroder les barres d’armature en diminuant l’épaisseur d’enrobage en surface du béton [1].

Le phénomène d’écailage apparaît notamment lors des hivers les plus rigoureux, et principalement à la surface des bétons en contact direct avec les sels de déglacage (tabliers de ponts, trottoirs en béton, pavages en béton ...). Cependant, il est possible de l’observer sur des surfaces verticales. Cela est principalement dû à la projection des sels lors du passage de véhicules sur les chaussées, ou sur les trottoirs. Comme le montre la figure 2.1,

la zone du béton la plus détériorée est proche des bords. En s'éloignant, l'écaillage est moins important car le béton a été moins exposé aux sels déglacants.



**FIGURE 2.1 - Exemple de terrasse en béton présentant des dégradations par écaillage**

La figure 2.2 présente le même processus de dégradation, mais dans le cas de cycles de gel-dégel accélérés en conditions de laboratoire. Ces deux figures (figures 2.1 et 2.2) montrent qu'autant pour des plaques exposées en conditions accélérées que pour des plaques en conditions naturelles, une dégradation de la pâte de ciment et du mortier est très facilement observable. De plus, les deux bétons présentent des granulats qui apparaissent en surface, et même des cratères correspondant à des granulats ayant totalement disparus.



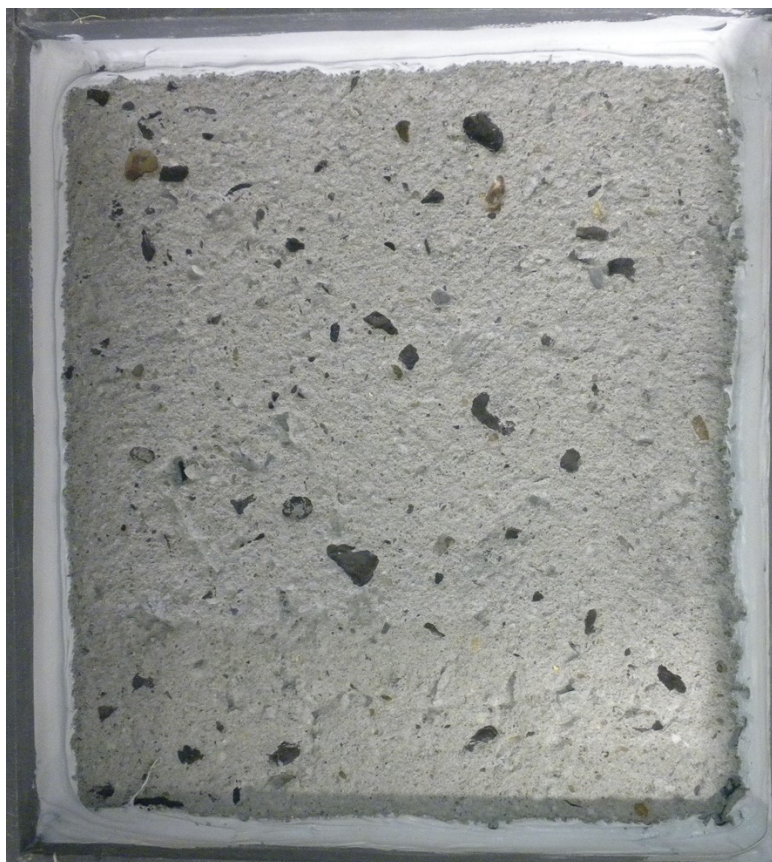


FIGURE 2.2 - Exemple de plaque d'écaillage dégradée en conditions de laboratoire

De nombreux modèles ont été développés à ce jour pour expliquer le mécanisme responsable de l'écaillage [2]. Cependant, aucun n'a pu expliquer tous les cas d'écaillage connus. Ainsi, il semblerait que l'origine de l'écaillage résulte d'une combinaison de plusieurs de ces modèles. Deux d'entre eux sont présentés dans les paragraphes suivants. Ces modèles sont davantage expliqués pour la pâte de ciment, mais ils sont également applicables pour les gros granulats (détaillés dans le paragraphe 2.2).

#### **2.1.1.1 Modèle des pressions hydrauliques**

Ce modèle a été proposé par Powers en 1949 [3]. La pression hydraulique apparaît lorsque l'eau présente dans la pâte de ciment gèle. Si la pâte est saturée en eau, l'augmentation du volume de cette dernière lors du gel (de l'ordre de 9 %) entraîne une migration vers les pores non saturés. Powers a utilisé la loi des écoulements en milieu poreux de Darcy pour mettre en avant les pressions engendrées par ce phénomène. Powers a déterminé la longueur maximale ( $L_{max}$ ) du trajet de l'eau entre deux bulles d'air afin que la pression

hydraulique engendrée ne soit pas supérieure à la résistance maximale supportable par le béton [4].

Ainsi, lorsque l'écart entre les bulles d'air  $L$  est plus importante que  $L_{max}$ , les contraintes en traction que subit le béton sont supérieures à sa résistance, qui est relativement faible, entraînant une fissuration de la pâte de ciment. La demi-distance moyenne entre les bulles d'air est couramment référencée dans la technologie du béton comme le facteur d'espacement  $\bar{L}$ . La figure 2.3 représente schématiquement cette distance entre deux bulles d'air.

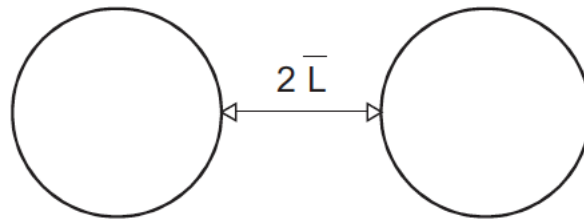


FIGURE 2.3 - Distance  $2\bar{L}$  séparant deux bulles d'air [1]

Cependant, ce modèle de Powers [3] n'est pas suffisant pour comprendre le phénomène d'écaillage entièrement. En effet, il s'est appuyé sur le fait que l'eau soit expulsée des pores capillaires mais expérimentalement l'inverse est observé [4]. L'eau migre des pores des C-S-H (Silicate de Calcium Hydraté) vers les capillaires. Cette théorie a néanmoins pu mettre en avant l'importance du facteur d'espacement et de la qualité du réseau d'air.

#### 2.1.1.2 Modèle des pressions osmotiques

Suite au modèle précédent incomplet, Powers a développé un second modèle avec l'aide de Helmuth [1]. Il s'agit du modèle qui traduit le mieux les actions des sels déglçants [2]. Leur présence en surface explique les détériorations très présentes dans cette zone. En effet, les sels de déglçage sont dissous dans l'eau et pénètrent le béton en surface en remplissant les bulles d'airs et les pores capillaires non saturés. À l'inverse du premier modèle, la concentration élevée en ion de l'eau des pores engendre une diminution de la température

de fusion, ce qui devrait avoir pour effet de diminuer les pressions hydrauliques. Cependant, ce n'est pas ce qui est observé [1].

Dans les gros pores, le gel de l'eau tend à augmenter la concentration en ions de l'eau qui est encore liquide alors que dans les petits pores, l'eau, qui a une température de fusion plus basse comme l'a montré l'étude de Defay et co. [5], a toujours la même concentration. Ainsi, l'eau tend à migrer des petits pores vers les plus gros pores, et non pas l'inverse comme présenté dans le modèle des pressions hydrauliques. La figure 2.4 suivante présente cet effet.

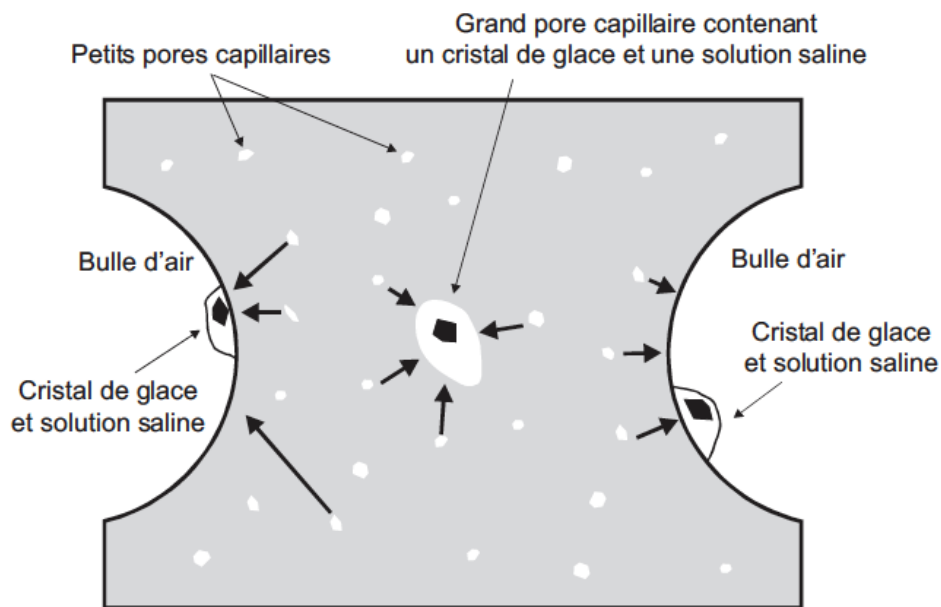


FIGURE 2.4 – Représentation schématique du modèle des pressions osmotiques [1]

L'effet de la concentration en ion est maximal pour une concentration d'environ 3%. La figure 2.5 illustrant le niveau de dégradation à l'écaillage en fonction de la concentration saline dans la solution montre bien un pic à une concentration saline de 3 %.

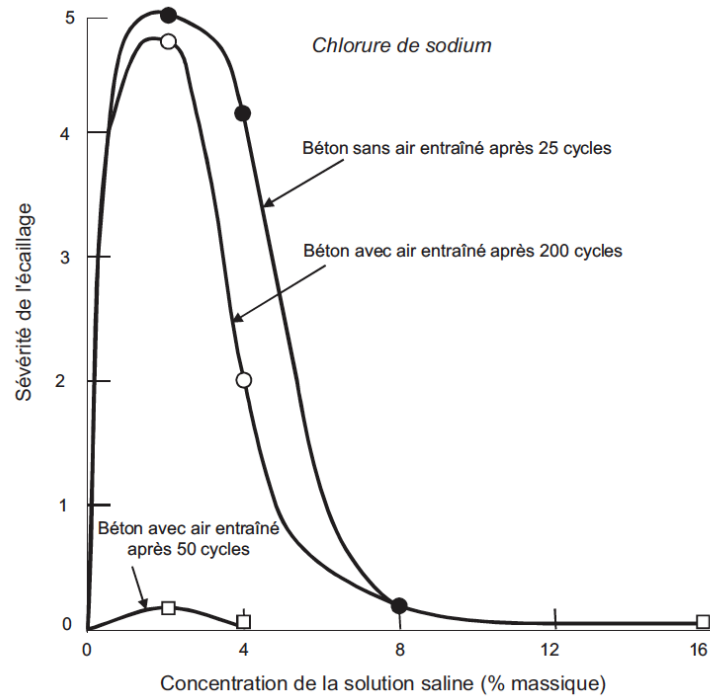


FIGURE 2.5 – Influence de la concentration en sel sur la dégradation à l'écaillage [1]

Ce modèle de pression osmotique permet d'expliquer les dommages engendrés proches de la surface, car les pressions osmotiques y sont plus importantes (la concentration saline y est plus importante). Néanmoins, le modèle n'explique pas pourquoi le béton peut écailler même en présence d'un produit qui n'augmente pas de volume en gelant comme l'alcool.

Ainsi, l'écaillage pourrait résulter d'une combinaison des deux modèles précédents [6]. Cela permet de comprendre les dégradations qui sont maximales pour des concentrations ioniques de 3 à 6%. Pour des concentrations plus faibles, les pressions hydrauliques sont prédominantes tandis que pour une concentration de plus en plus élevée, les pressions hydrauliques diminuent du fait de la diminution du point de fusion de l'eau.

La figure 2.6 montre l'effet des deux modèles sur les pressions internes du béton. Il est ainsi possible de valider la combinaison des pressions hydrauliques et osmotiques.

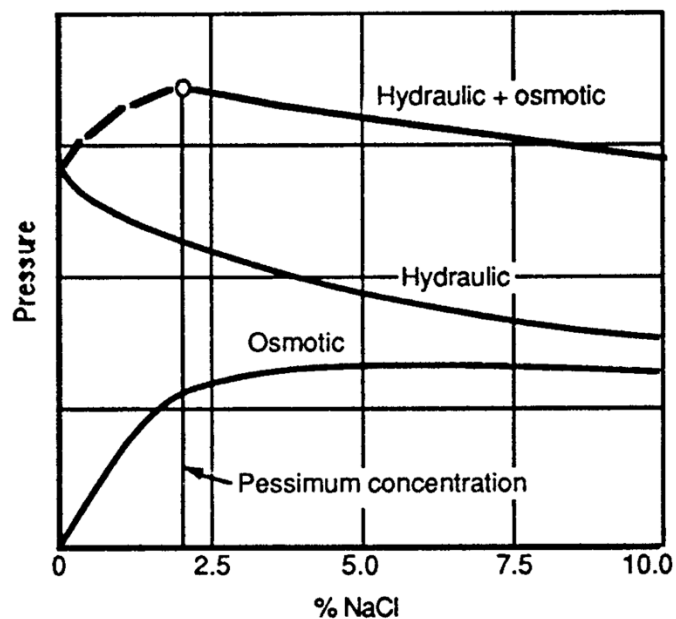


FIGURE 2.6 - Pression interne au béton en fonction de la concentration en NaCl [6]

## 2.1.2 PARAMETRES INFLUENTS

### 2.1.2.1 Volume d'air/Facteur d'espacement

Afin de protéger les bétons exposés aux sels déglacants, il faut garantir un réseau d'air de bonne qualité pour respecter le  $\bar{L}$  critique. En effet, ce réseau de bulles d'air peut diminuer les pressions hydrauliques et osmotiques dans la pâte de ciment hydraté. L'utilisation d'un agent entraîneur d'air permet d'augmenter le volume d'air contenu dans le béton. La figure 2.7 montre qu'avec un volume d'air compris entre 4 et 6 % le béton est mieux protégé contre l'écaillage.

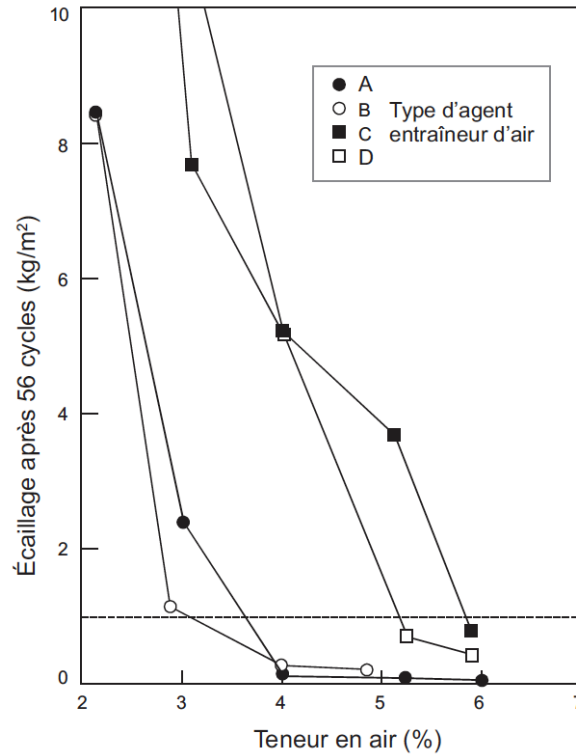


FIGURE 2.7 - Influence du volume d'air entraîné et du type d'agent entraîneur d'air [7]

Néanmoins, ce n'est pas suffisant pour garantir la protection contre l'écaillage [7]. En effet, même si différents agents entraîneur d'air (AEA) peuvent procurer un volume d'air équivalent, la taille des bulles ne sera pas identique entre chaque béton, ce qui explique les écarts présents sur la figure 2.7 entre les différents AEA. Aucune valeur critique du volume d'air ne garantit la disparition du phénomène d'écaillage [7].

Le béton contenant des bulles d'air de dimensions plus faibles sera mieux protégé [1]. Le facteur d'espacement permet de considérer la dimension des bulles pour la résistance à l'écaillage (figure 2.8). La diminution du facteur d'espacement montre une amélioration de la résistance à l'écaillage, mais ne présente pas une valeur limite garantissant un écaillage nul. Pour des bétons avec des valeurs de rapport eau/ciment (E/C) usuelles (0,40 – 0,50), un facteur d'espacement inférieur à 200  $\mu\text{m}$  permet d'offrir une durabilité à l'écaillage suffisante. Cette valeur a pu être vérifiée par des bétons en conditions réelles [1] [2].

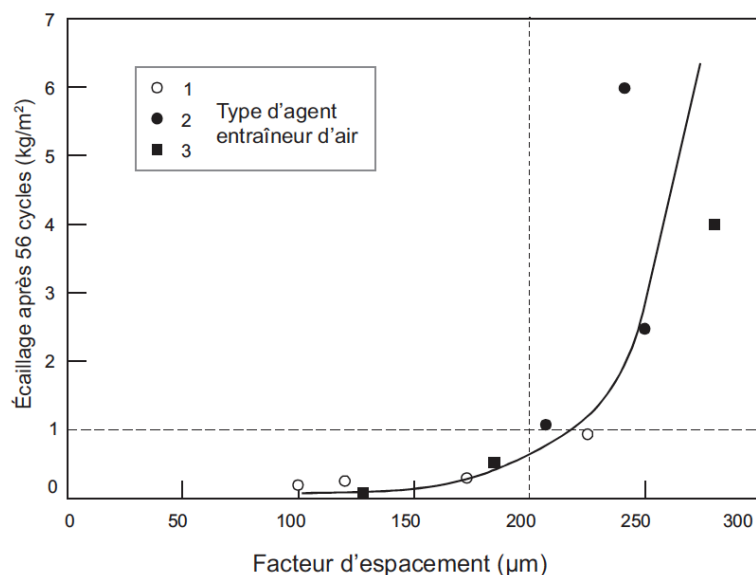


FIGURE 2.8 – Influence du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage (E/C de 0,43 à 0,47) [7]

### 2.1.2.2 Rapport E/C

Le rapport eau/ciment (E/C) est fortement lié à l'air présent dans le béton. Plus celui-ci est élevé, plus la porosité capillaire est importante (mais ce n'est pas le seul paramètre influant sur la porosité d'un béton). Une diminution du rapport E/C entraîne une diminution de la porosité mais aussi de la dimension des pores capillaires de la pâte de ciment hydraté. Par conséquent, la quantité d'eau gelable contenu dans ces pores est également réduite, ce qui a pour effet d'améliorer la résistance à l'écaillage [1].

Cependant, une augmentation du E/C provoque une augmentation de la perméabilité et non un facteur d'espacement plus faible. Ainsi, il est important d'utiliser des AEA afin de diminuer le facteur d'espacement et atteindre une valeur limite. Celle-ci est de 250  $\mu m$  pour un E/C inférieur à 0,5 [9]. En effet, il faut atteindre des valeurs très basses de E/C, en dessous de 0,25, pour ne plus nécessiter un AEA et résister aux sels fondants [1] [2].

Ainsi, un réseau d'air de mauvaise qualité ( $\bar{L} > 250 \mu m$ ) nécessite un rapport E/C maximum de 0,35 pour diminuer grandement le phénomène d'écaillage. Il est à noter que certains ciments (les plus fins) permettent d'améliorer la résistance à l'écaillage [2]. Les bétons produits avec des ciments ayant une finesse élevée présentent une meilleure imperméabilité et donc résiste mieux au phénomène d'écaillage.

### **2.1.2.3 La fumée de silice**

L'ajout de fumée de silice n'a pas un impact négatif sur l'écaillage du béton sous certaines conditions. En effet, il faut s'assurer que moins de 10% du ciment ne soit remplacé par l'ajout cimentaire [1] [2]. De plus, un rapport E/L (Eau/Liant) inférieur à 0,3 permet d'obtenir un réseau d'air de qualité suffisante pour ne pas dégrader la résistance à l'écaillage recherchée. Avec l'utilisation de fumée de silice, il faut toujours garantir un bon réseau d'air grâce à l'utilisation d'un AEA par exemple, même si certains BHP (Béton à Haute Performance) peuvent s'en passer (si le E/L est inférieur à 0,25) [8].

### **2.1.2.4 Les cendres volantes**

Le cas des cendres volantes est un point sensible pour la résistance à l'écaillage. En effet, son utilisation diminue la durabilité du béton exposés aux sels déglacants dans des conditions de laboratoires. Cependant, il n'y a pas encore suffisamment de connaissances sur le phénomène pour le comprendre et expliquer cette contre-performance [2].

Quelques hypothèses ont été mises en avant. La première est la durée de mûrissement : celle-ci doit être suffisamment longue, supérieure à 28 jours, pour permettre à la cendre volante de participer à la production d'hydrates. Une deuxième hypothèse vient compléter cette dernière : le béton contenant des cendres volantes aurait une perméabilité plus importante en surface ce qui amplifierait les mécanismes de fissuration et d'écaillage par conséquent. Pour revenir à la période de mûrissement, le ciment Portland s'hydraterait avant la cendre volante durant les premiers jours et justifierait la nécessité d'allonger le mûrissement. De plus, la réaction pouzzolanique de la cendre volante près de la surface est très sensible à la carbonatation. Si au jeune âge (avant 14 jours) un phénomène de carbonatation se produit à la surface, la réaction pouzzolanique de la cendre volante sera bloquée. Elle ne peut donc pas participer à la densification de la pâte près de la surface [9] [10] [11] [12] [13].



Même s'il est certain que les performances face à l'écaillage diminuent avec l'ajout de cendre volante, ces pertes de durabilité varient en fonction des caractéristiques physico-chimiques de la cendre utilisée [2].

Afin de pallier ces problèmes, il faut garantir une très bonne qualité de réseau d'air ( $\bar{L} < 200 \mu m$ ) et limiter le taux de remplacement à des valeurs inférieures à 30 % [2]. Dans le cas de taux de remplacement de plus de 50 %, même un réseau d'air de qualité ( $\bar{L}$  inférieur à 250  $\mu m$ ) et un faible E/L (inférieur à 0,3) ne garantissent pas une bonne résistance à l'écaillage [2].

#### **2.1.2.5 Les laitiers de haut fourneau**

L'utilisation de laitier de haut fourneau pour des bétons exposés aux cycles de gel-dégel et aux sels déglaçants est actuellement peu connue. En effet, seules quelques recherches ont été réalisées mais sont pour certaines contradictoires [14] [15]. Certaines études précisent que l'utilisation de laitier diminue la résistance à l'écaillage, tandis que d'autres présentent une amélioration de la durabilité. Tout comme pour les bétons contenant de la cendre volante, les bétons contenant des laitiers de haut fourneau présentent des résultats mal corrélés entre les essais en laboratoires et les performances en service [1]. La durabilité en service étant généralement supérieure à la durabilité mesurée en laboratoire.

Un point a cependant été soulevé concernant la diminution de la durabilité : la carbonatation de la pâte de ciment serait une cause possible [16]. En effet, l'utilisation de laitier produit une moins grande quantité de CH ce qui diminue la capacité tampon de la pâte et favorise une carbonatation plus rapide. Près de la surface, l'hydratation du laitier n'est plus activée par un pH élevé, ce qui augmente la porosité capillaire.

## **2.2 LES GROS GRANULATS**

### **2.2.1 CARACTERISTIQUES ET DEFINITION**

Les gros granulats de densité normale doivent se composer de pierre concassée, de graviers naturels, de laitier de haut-fourneau refroidi à l'air, ou d'un mélange de ceux-ci et être conformes à la norme CSA A23.1 [17].

De nombreuses caractéristiques permettent de définir la qualité des gros granulats. Il y a notamment :

- La résistance à l'abrasion ;
- Le module élastique ;
- La macro et micro texture de surface (rugosité) ;
- La minéralogie ;
- La teneur en alcalis, en chlorures et les impuretés ;
- La résistance aux cycles de gel-dégel dans un état non-confiné ;
- La résistance aux cycles de mouillage-séchage ;
- La résistance à l'impact (Micro Deval, Los Angeles) ;
- L'absorption ;
- La porosité [18].

Certaines de ces caractéristiques sont particulièrement importantes en regard de la résistance à l'écaillage. La résistance à l'abrasion et la résistance aux cycles de gel-dégel dans un état non confiné en font partie [18]. Une conséquence de l'utilisation de gros granulats de qualité insuffisante est l'apparition de « pop-out » en surface.

### ***2.2.2 INFLUENCE DES GROS GRANULATS SUR L'ECAILLAGE***

Les gros granulats ont une structure physique se rapprochant de celle des bétons : une porosité qui peut être plus ou moins saturée. Cela justifie le fait que certains mécanismes de destruction par le gel appliqués au béton sont applicables aux gros granulats. Néanmoins, à l'inverse du béton, dans le cas des granulats, cette porosité ne peut être ni contrôlée, ni modulée.

Un des facteurs les plus importants pour caractériser si un granulat est gélif ou non est son degré de saturation. Si celui-ci est supérieur à 90 % [1] [4], les pores du granulat ne sont pas suffisants pour contenir l'expansion de l'eau gelée. Par conséquent, cette eau excédentaire doit être expulsée. Cela entraîne des pressions hydrauliques pouvant engendrer la destruction du granulat si cette pression est supérieure à la résistance en tension de ce granulat. De plus, une dimension maximale du granulat existe pour lui

permettre de pouvoir expulser l'eau avant que la pression ne devienne supérieure à sa résistance. La dimension limite n'est pas la même pour des degrés de saturation différents [1] [4]. Ceci explique qu'un gros granulat présente un risque plus important à la destruction qu'un sable face au gel. De plus, un granulat de plus grande dimension a un volume plus important et libère donc une plus grande quantité d'eau dans le béton.

La quantité d'eau absorbable par le granulat se traduit par le volume de pores du granulat. La vitesse d'absorption est quant à elle traduite par la dimension des pores du granulat et leur connectivité [1] [4]. Le volume total de pores présente également la capacité du granulat à être saturé plus ou moins rapidement dans un milieu humide.

La durabilité du granulat a été estimée à partir de la dimension et la répartition des pores dans le cas de 30 granulats différents [4]. La figure 2.9 montre le volume de pores en fonction du diamètre médian de ces pores. Elle permet également de démontrer que les granulats ayant une porosité inférieure à 0,015 cm<sup>3</sup>/g ont généralement une meilleure durabilité face au gel, quel que soit le diamètre médian de la porosité.

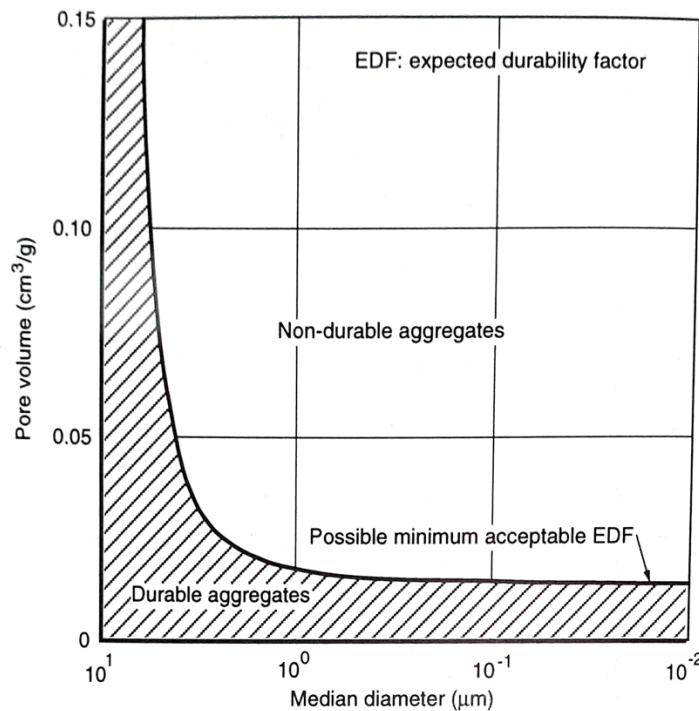


FIGURE 2.9 - Combinaisons du volume total des pores et du diamètre médian des pores pour des granulats durables et non-durables [4]

Dans le cas d'un granulat poreux et saturé en eau soumis au gel, des pressions hydrauliques intenses se créent et peuvent mener à la détérioration de ce granulat. S'il se présente dans un milieu confiné comme le béton, il peut générer des cratères en surface (ou « pop-out ») en arrachant le mortier ou la pâte de ciment situés au-dessus de lui suite à des pressions hydrauliques trop élevées (figure 2.10).

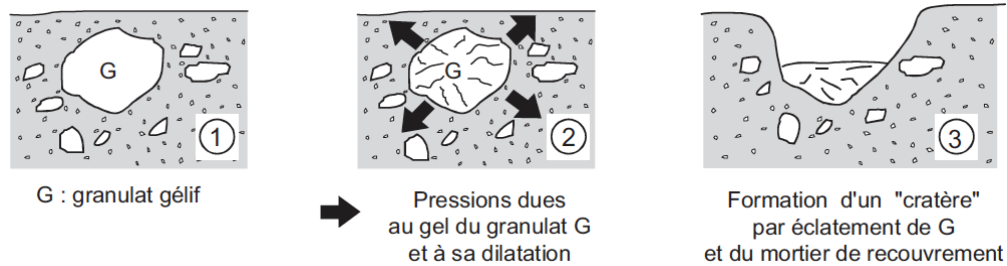


FIGURE 2.10 - Fissuration d'un granulat dans un béton exposé au gel [1]

Dans le béton, l'environnement entourant le granulat (le mortier) peut accélérer ce processus de détérioration. En effet, par exemple, l'eau expulsée par le granulat gélif peut être bloquée par l'imperméabilité de la pâte de ciment et engendrer une augmentation des pressions hydrauliques dans la zone de transition entre le granulat et la pâte de ciment hydraté [4]. L'effet inverse est également remarqué. Un béton avec un réseau d'air de meilleure qualité (pores plus petits et bien répartis) peut diminuer les contraintes et donc prévenir la dégradation du granulat et du béton.

Il a ainsi été relevé trois types de granulats répondant à ce mécanisme de gel [1] [4] :

- Les granulats à forte porosité et forte perméabilité. Ils sont peu gélifs grâce à leur capacité à expulser rapidement l'eau des pores. Le milieu environnant doit pouvoir dissiper cette eau supplémentaire (la pâte de ciment hydraté doit être relativement perméable) ;
- Les granulats à faible porosité et faible perméabilité. Ils ne peuvent pas contenir une quantité d'eau importante et donc rejettent peu d'eau dans le béton. Ces granulats affectent donc que très peu la résistance du béton au gel-dégel ;
- Les granulats à porosité et perméabilité intermédiaires. Dans un béton de bonne qualité (peu perméable), ces granulats ne sont que rarement saturés. Néanmoins, si

ces granulats doivent libérer de l'eau dans ce type de béton, il y aura d'autant plus de contrainte hydraulique dans la zone de transition que le béton est imperméable, même s'il possède de l'air entraîné car les bulles d'air sont dans la pâte et non à l'interface pâte-granulat.

Un projet de recherche réalisé à l'Université de Sherbrooke (QC, Canada) a cherché à démontrer l'influence des gros granulats sur la résistance à l'écaillage [19]. Il a été pour cela choisi de comparer un granulat de référence et un granulat dit marginal (granulat dont les caractéristiques physico-mécaniques sont à la limite de la conformité réglementaire). Après avoir développé une méthode pour quantifier le nombre de « pop-out » apparus, les deux bétons ont pu être comparés.

Ces recherches ont pu montrer expérimentalement qu'une plus grande quantité de débris d'écaillage a été obtenue avec le mélange de béton incorporant le granulat aux propriétés marginales, et ce pour un même facteur d'espacement. De plus, à masses de débris égales, les bétons avec le granulat de référence ont montré un facteur d'espacement plus élevé (figure 2.11). Il en a été déduit que malgré un meilleur réseau d'air dans la pâte de ciment, si les granulats ne sont pas de qualité suffisante, ceux-ci éclatent et forment des « pop-out », et donc de l'écaillage. Cela a pu être démontré en analysant le pourcentage de la surface de granulats éclatés en proportion de la surface totale du béton exposé (figure 2.12).

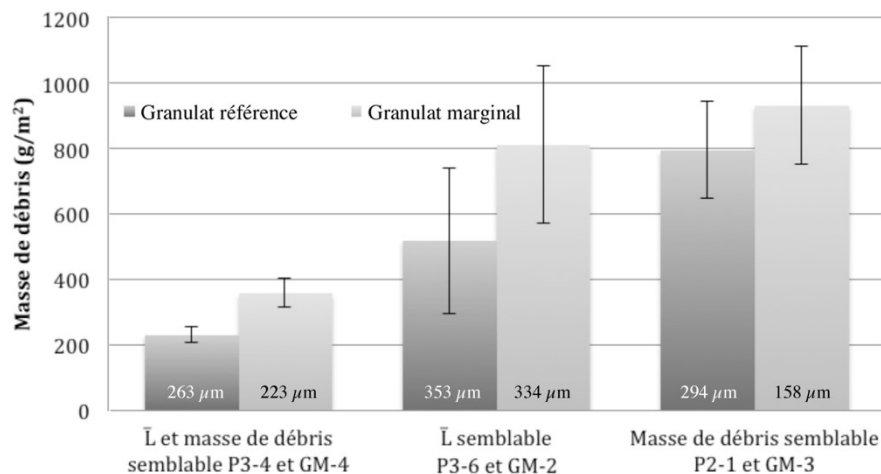


FIGURE 2.11 - Influence du gros granulat marginal sur la masse de débris en fonction de trois types de comparaisons par rapport au granulat de référence [19]

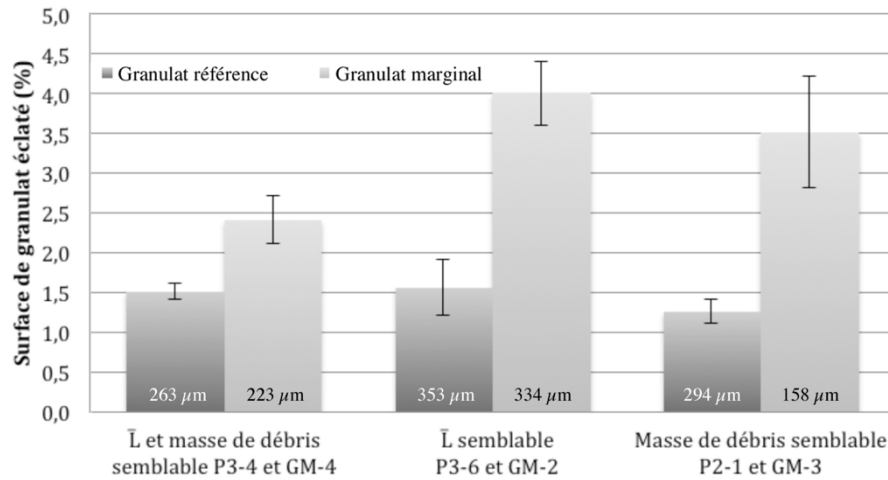


FIGURE 2.12 - Comparaisons des surfaces de granulats éclatés lors de l'écaillage pour les deux granulats [19]

## 2.3 ESSAIS ET NORMES

### 2.3.1 L'ESSAI MICRO DEVAL

La méthode d'essai Micro Deval présentée dans cette section fait référence à la procédure d'essai normalisée CSA A23.2-29A 2014 [20].

L'essai Micro Deval détermine la résistance à l'usure par attrition du gros granulat dans un appareil portant le même nom. Il consiste à mesurer la résistance et la durabilité à l'abrasion et au broyage par l'action de billes en acier, le tout en présence d'eau.

Un échantillon de granulat est préparé selon les exigences des tableaux 2.1 à 2.3, donnant la granulométrie requise pour l'essai. La masse totale de l'échantillon doit être de  $1500 \pm 5$  g. Ces tableaux indiquent la masse et la granulométrie des échantillons à utiliser en fonction de la dimension maximale nominale du gros granulat.

TABEAU 2.1 - Dimension nominale maximale du granulat de 10 mm [20]

Tamisat, mm	Retenu, mm	Masse, g
10	5	1500

**TABLEAU 2.2 - Dimension nominale maximale du granulat de 14 mm [20]**

Passant, mm	Retenu, mm	Masse, g
14	10	750
10	5	750

**TABLEAU 2.3 - Dimension nominale maximale du granulat de 20 mm [20]**

Tamisat, mm	Refus, mm	Masse, g
20	14	750
14	10	750

Par la suite, la charge abrasive est mesurée : il faut  $5000 \pm 5$  g de billes d'acier de  $9,5 \pm 0,5$  mm de diamètre. L'échantillon est placé dans la jarre avec 2,0 L d'eau et la charge abrasive. La jarre est ensuite soumise à un mouvement rotatif à une vitesse de 100 tr/min pendant 2 heures (figure 2.13).

À la fin de l'essai, l'échantillon est lavé, séché à l'étuve et tamisé au travers d'un tamis de 1,25 mm à mailles carrées. La quantité de matière passant le tamis est exprimée en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon. Il est ainsi obtenu la perte massique par essai Micro Deval.



FIGURE 2.13 - Appareil Micro Deval [19]

Comme il a été précisé plus haut, l'intérêt de cet essai est de fournir des informations sur la capacité du granulat à résister à l'abrasion, de définir sa dureté, sa durabilité et sa résistance sous l'effet des intempéries. De plus, il indique la résistance du granulat face à la dégradation lors de la manutention, du malaxage ou du compactage.

L'utilisation d'eau pour l'essai est justifiée par la chute de résistance des granulats à l'état mouillé. Cette perte est quantifiable grâce à l'essai Micro Deval.

L'essai Micro Deval a été développé dans les années 1960 en France et conçu avec des équipements provenant de l'industrie du broyage [21]. Il n'a été instauré au Canada, notamment au Québec et en Ontario, que plus tard afin de compenser les manques de précision des essais Los Angeles et de résistance aux sulfates de magnésium. En effet, la précision du test Micro Deval est meilleure que ce dernier [21]. De plus, il a été obtenue une certaine corrélation entre les deux essais (figure 2.14).



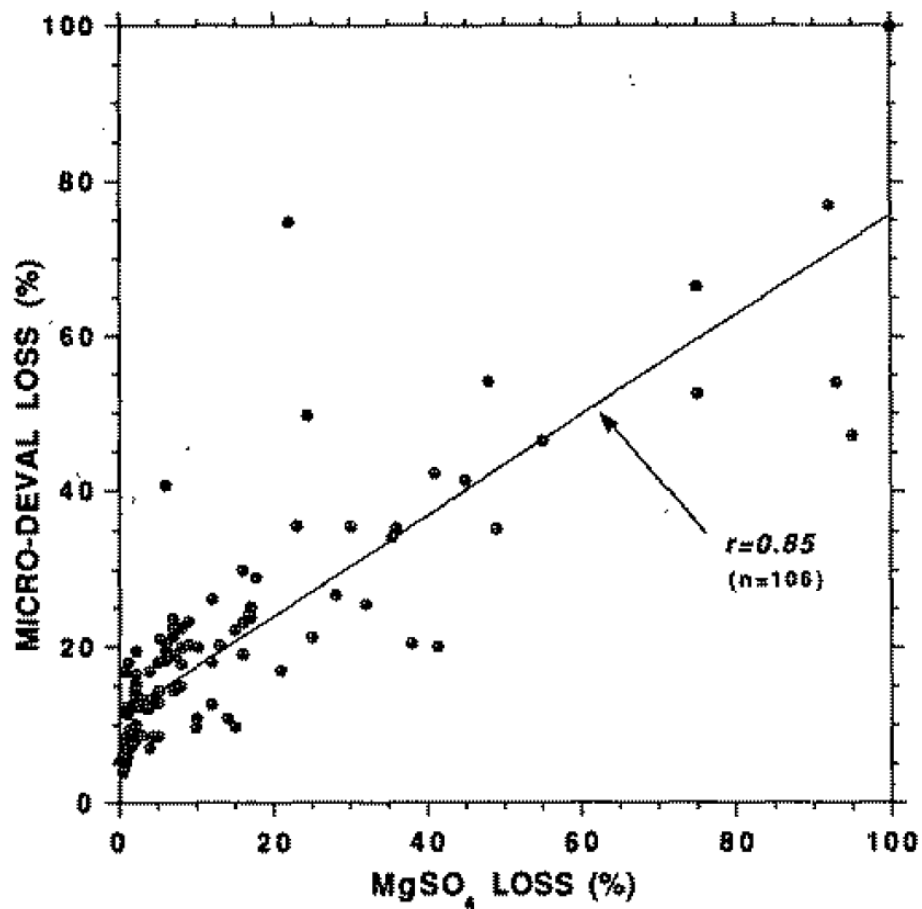


FIGURE 2.14 - Corrélation entre l'essai Micro Deval et l'essai de durabilité au sulfate de magnésium [21]

L'essai Micro Deval permet également de différencier la performance des granulats pour leur utilisation. En effet, en combinaison avec le nombre pétrographique, l'essai Micro Deval est un bon indicateur de performance, comme le montre la figure 2.15.

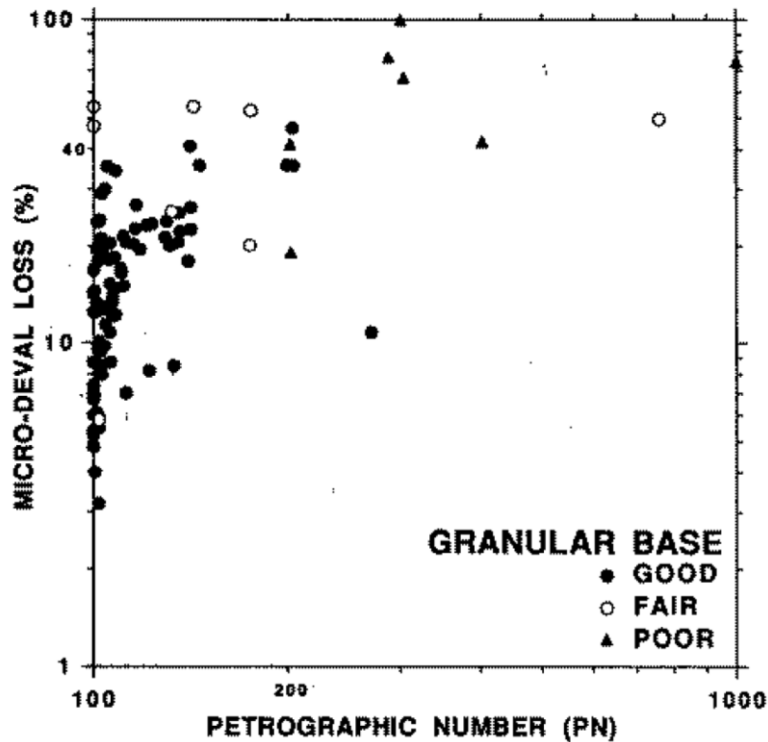


FIGURE 2.15 - Champ des indices de performance des granulats en fonction du nombre pétrographique et de la perte massique à l'essai Micro Deval [21]

Comme indiqué précédemment, la présence d'eau lors de l'essai permet de mieux évaluer les performances du granulat car cela est plus représentatif des conditions d'utilisation dans le béton où les granulats sont placés dans un milieu humide [22].

L'étude réalisée par C. Rogers, B. Lane et S. Senior (2003) [22] a également permis d'évaluer la précision de l'essai Micro Deval en réalisant des essais inter-laboratoires. Les figures 2.16 et 2.17 montrent une variabilité moins importante pour l'essai Micro Deval que pour l'essai de résistance à la désagréation aux sulfates de magnésium (à noter que les deux essais ont été réalisés par les mêmes laboratoires).

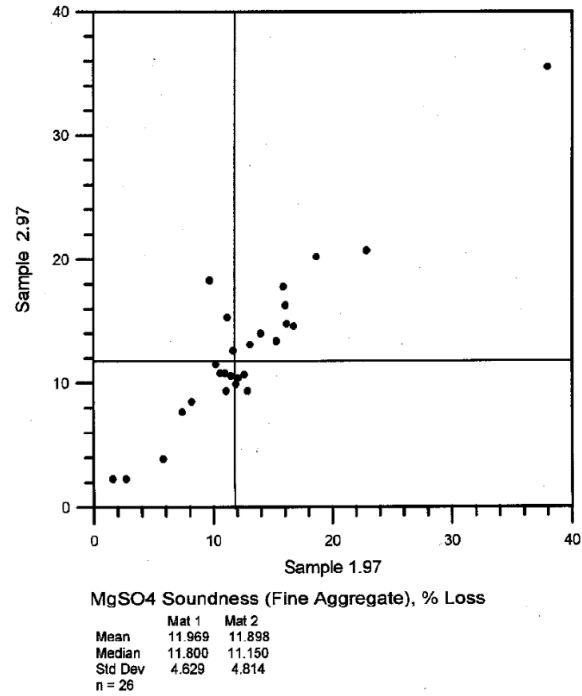


FIGURE 2.16 - Résultats inter-laboratoires des essais de durabilité au sulfate de magnésium [22]

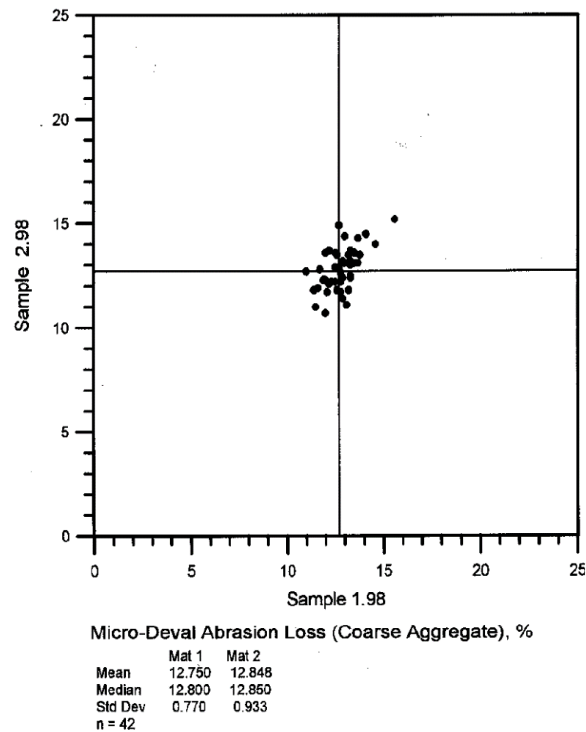


FIGURE 2.17 - Résultats inter-laboratoires des essais Micro Deval pour des gros granulats [22]

Il a été démontré que plus la perte massique est faible, plus la variation entre les laboratoires est importante. Le tableau 2.4 présente ces résultats.

TABLEAU 2.4 - Variation des essais d'abrasion Micro Deval inter-laboratoires [22]

Micro-Deval Abrasion Test	various aggregates mean loss (%)	coefficient of variation <sup>1</sup> (1S%)	d2s% <sup>1</sup>
Fine aggregate	38	2.6	7
	20	4.1	12
	19	5.6	16
	10.5	6.0	17
	7	8.1	23
Coarse aggregate	21	5.3	15
	17	5.6	15
	12	6.4	18
	5	10.0	28

<sup>1</sup> d2s% = that value, as a per cent of the mean micro-Deval loss of the aggregate, which will not be exceeded by the difference in results obtained in two different laboratories on samples of the same aggregate, 95% of the time.

Cependant, l'essai Micro Deval n'est pas parfait. Il rencontre des écarts de mesures dans le cas des granulats fins (figure 2.18). Cela est dû à la finesse du sable utilisé pour l'essai [21] [23].

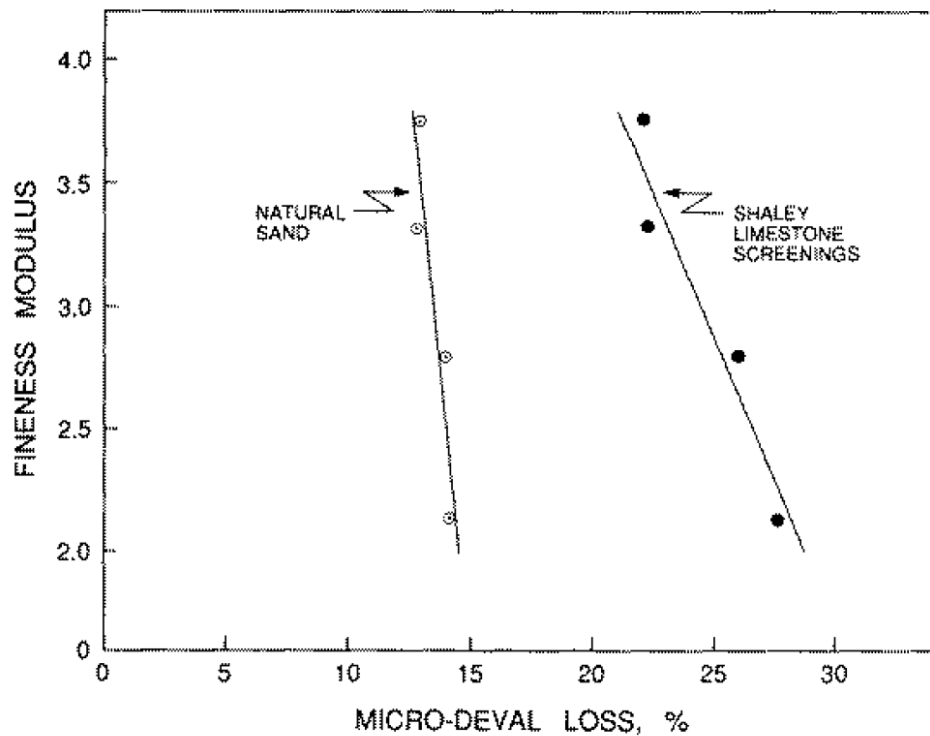


FIGURE 2.18 - Perte à l'essai Micro Deval en fonction du module de finesse [23]

Cela se traduirait par une influence de l'énergie mise en œuvre lors de l'essai (vitesse de rotation, masse des billes d'acier) et la taille des particules testées [23]. En effet, la norme précise une durée applicable aux appareils calibrés pour une vitesse de rotation de  $100 \pm 5$  tr/min. Une limite de tours serait plus précise et permettrait de limiter les variations et améliorer la précision [22].

### **2.3.2 L'ESSAI DE GEL-DEGEL NON CONFINÉ**

La méthode d'essai de gel-dégel non confiné présentée dans cette section fait référence à la procédure d'essai normalisée CSA A23.2-24A 2014 [24].

L'essai de gel-dégel non confiné permet de quantifier la désintégration de granulats après les avoir soumis à 5 cycles de gel-dégel dans une solution contenant des chlorures de sodium. Chaque cycle dure 24 h. La perte massique est calculée à l'aide d'une analyse granulométrique à la fin des 5 cycles.

La première étape consiste à préparer la solution et l'échantillon. Il faut pour cela dissoudre 30 g de chlorure de sodium dans 1 L d'eau et remuer jusqu'à dissolution complète du solide. Remuer de nouveau avant son utilisation. Ensuite, les granulats, séchés à l'étuve au préalable, sont tamisés pour obtenir la répartition massique donnée dans le tableau 2.5.

TABLEAU 2.5 - Masse minimale des échantillons d'essai [24]

Passant, mm	Retenu, mm	Masse, g
40	28	5000
28	20	2500
20	14	1250
14	10	1000
10	5	500

Les fractions de granulats sont placées dans des contenants de dimensions adaptées (figure 2.19). Ils sont alors remplis par la solution de chlorure de sodium jusqu'à ce que les granulats soient entièrement immergés. Les contenants sont scellés et laissés à température ambiante durant  $24 \pm 2$  heures.



FIGURE 2.19 - Échantillon de gel-dégel non confiné [19]

L'eau des contenants est drainée en renversant ces derniers sur un tamis de 5 mm pendant 5 s. Les granulats ne doivent pas sortir du contenant. Ils sont ensuite scellés et placés dans le congélateur en s'assurant que les contenants ne se touchent grâce à des diviseurs placés entre chaque contenant. La température du congélateur doit être de  $-18 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant  $16 \pm 2$  h. Puis ils sont laissés à dégelé durant  $8 \pm 1$  h à température ambiante. Cela constitue un cycle. Cette étape est répétée 5 fois.

À la fin du dernier cycle, les granulats sont rincés à l'eau du robinet à 5 reprises en prenant soin qu'ils ne sortent pas du contenant. Ensuite, les contenants sont placés dans une étuve à  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , jusqu'à obtenir une masse constante. Chaque fraction de granulat est tamisée pendant 3 minutes sur le même tamis utilisé pour préparer l'échantillon. Les masses de la fraction retenue et passante sont notées. Enfin, la perte pondérée est calculée comme suit :

- multiplier le pourcentage de retenu avec celui de passant pour chaque fraction ;
- faire la somme ces produits et diviser par 100.

Le résultat est le pourcentage moyen pondéré de perte de masse par gel-dégel. Le tableau 2.6 montre un exemple de calcul.

TABLEAU 2.6 - Exemple de la perte de masse pondérée [24]

Fraction granulométrique, mm	Perte, %	Refus, %	Perte de masse moyenne pondérée
20 à 14	15,0	20,0	300
14 à 10	18,0	30,0	540
10 à 5	16,0	50,0	800
Total			1640

\*Perte pondérée moyenne de masse par gel-dégel =  $1640/100 = 16,4 \%$ .

De nombreux paramètres peuvent influencer l'essai. Une étude de C.A Rogers, S.A. Senior et D. Boothe [25] a mis en avant plusieurs d'entre eux. Le premier est la concentration de la solution de chlorure de sodium utilisée. Ils ont pu vérifier qu'une concentration comprise entre 2 et 4% est plus sévère que pour des valeurs plus importantes. Ils en ont conclu qu'une concentration en ions chlore de 3% est la plus sévère (Cf. tableau 2.7). Elle a donc été retenue pour normaliser l'essai.

TABLEAU 2.7 - Perte massique au gel-dégel après 5 cycles [25]

ROCK TYPE	NaCl Concentration			
	0%	3%	5%	8%
Sandstone	3.4	4.9	2.9	1.7
Argillite	2.5	4.7	3.0	2.9
Diabase	1.4	0.5	0.8	0.4
Sandstone	1.1	10.3	2.7	0.7
Sandy Dolostone	6.7	27.8	24.5	10.6
Shaley Dolostone	4.4	67.3	61.6	34.3
Granite	0.4	1.1	0.4	0.7
Granite	1.2	1.4	3.1	1.8
Mica Schist	4.9	4.9	5.9	5.6
Dolostone	0.4	2.3	2.4	0.6
Shaley Dolostone	3.6	68.4	78.3	88.2
Limestone	3.0	33.0	23.1	15.0
Siltstone	6.3	38.5	41.5	21.5
Mica Schist	4.1	4.4	3.6	3.1
Shaley Dolostone	0.8	48.4	63.7	40.2
Shaley Dolostone	2.3	42.3	42.0	36.9
Limestone	5.3	11.4	9.5	4.4
Limestone	1.4	38.9	28.8	16.2
Sandstone	1.0	32.7	15.8	7.1
Limestone	1.7	42.8	35.6	14.7
Dolostone	1.0	1.5	1.3	0.3
Dolostone	0.1	10.0	6.2	3.4
Sandstone	3.1	30.6	14.1	10.2
Limestone	5.1	23.8	27.3	13.9
Limestone	1.9	7.1	4.5	3.6
MEAN LOSS	2.68	22.36	20.07	13.50

De la même manière, le nombre de cycles de gel-dégel influence l'essai. Pour 10 cycles, les pertes sont environ 1,9 fois supérieures à celles d'un essai de 5 cycles. Cependant, il a été gardé 5 cycles dans la norme pour une question de durée de l'essai.

De plus, la température minimale des cycles interfère sur les résultats de l'essai. La figure 2.20 le montre. Les températures de -15 et -20°C entraînent des pertes massiques plus importantes.



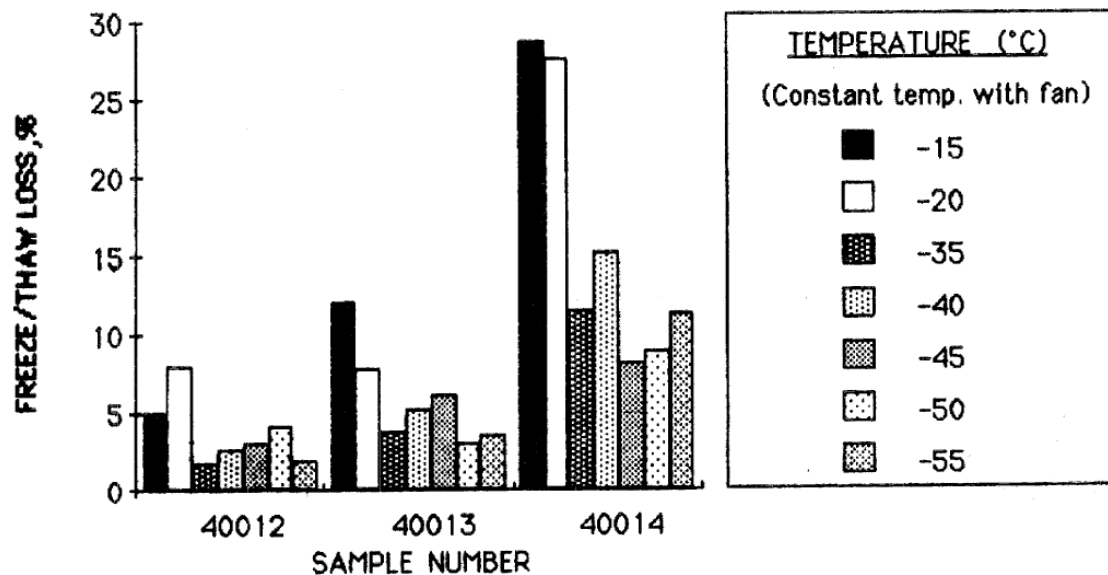


FIGURE 2.20 - Perte massique au gel-dégel en fonction de la température du congélateur [25]

Le test de gel-dégel non confiné possède une bonne précision inter-laboratoires [25]. Il peut également être corrélé au test de durabilité aux sulfates de magnésium mais est plus précis pour identifier les performances des granulats testés (figure 2.21).

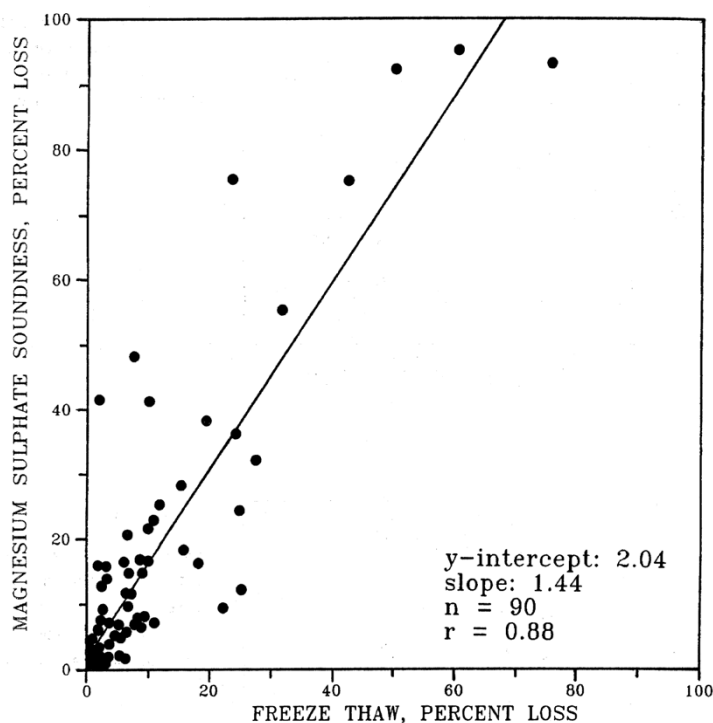


FIGURE 2.21 - Perte massique due au test de durabilité au sulfate de magnésium en fonction de la perte au gel-dégel [25]

### **2.3.3      *UNE COMBINAISON DE L'ESSAI MICRO DEVAL ET DE L'ESSAI DE GEL-DEGEL NON CONFINÉ***

L'essai de gel-dégel non confiné, tout comme l'essai Micro Deval, sont des essais qui tentent de reproduire l'effet de l'environnement et des sollicitations mécaniques sur la dégradation des granulats.

Malgré de bonnes estimations des performances des granulats avec ces tests (Micro Deval et gel-dégel non confiné), ils ne peuvent être utilisés seuls car ils ont tous deux certaines difficultés à différencier les granulats marginaux des granulats de faible qualité. Il est possible de réaliser des examens pétrographiques ou d'absorption d'eau par exemple, afin de mieux identifier la qualité des granulats [21].

Ainsi, aucun essai utilisé seul ne permet d'estimer adéquatement la performance en service d'un granulat à béton. Il est nécessaire, pour tenter d'y parvenir, d'utiliser les résultats d'une combinaison d'essais. L'interprétation des résultats de ces essais devra notamment prendre en compte l'environnement dans lequel le granulat et le béton seront exposés.

### **2.3.4      *L'essai d'écaillage***

Cet essai de durabilité fait l'objet des procédures d'essais normalisées CSA A23.2-22C 2014 [26] et BNQ 2621-905 Annexe B [27]. C'est ce dernier qui sera utilisé pour mesurer la durabilité à l'écaillage des bétons de cette étude.

Cet essai a pour but de déterminer la résistance à l'écaillage d'une surface plane de béton en présence d'agents déglacants et exposée à des cycles de gel-dégel. Il faut faire attention au fait qu'il ne s'agit pas d'un test sur la résistance du granulat ; il s'agit bien d'un essai sur le béton dans sa globalité (granulat, pâte de ciment et zone de transition).

Avant de réaliser l'essai, la solution de chlorure de sodium doit être préparée de la même manière que pour l'essai de gel-dégel non confiné (Cf. paragraphe 2.3.2) pour obtenir une concentration de 3,0% par masse dans de l'eau distillée.

La digue utilisée pour contenir la solution saline sur l'éprouvette d'essai peut être fabriquée dans différents matériaux : en caoutchouc rigide ou un isolant en polystyrène extrudé. Elle

doit être collée avec un produit d'étanchéité à base de silicone. Cette digue doit être appliquée après la cure humide du béton. Elle peut également être réalisée en mortier immédiatement après la finition de la surface de l'éprouvette afin de réaliser une liaison mécanique suffisante. La digue devra dépasser de 20 mm la surface de l'éprouvette et couvrir environ de 50 mm les arêtes.

Les dimensions de l'éprouvette sont quant à elles d'une profondeur de 75 mm et une surface de  $0,045 \text{ m}^2$  à minima. Un essai comprend deux éprouvettes. La consolidation est effectuée avec un bourroir pour un total de 51 coups pour une surface de  $0,066 \text{ m}^2$  (définis à partir de la surface de la plaque d'écaillage : un coup pour  $0,0013 \text{ m}^2$ ). L'arasement est effectué avec une planche d'arasement lisse en bois de section  $40 \times 90 \text{ mm}^2$  environ. Le nombre de passe sera limité à 15 allers-retours dans chaque direction, pour un total de passes maximal de 30.

La cure humide des éprouvettes est de 14 jours en chambre humide, suivie d'une cure de 14 jours en milieu ambiant ou jusqu'à l'obtention d'une résistance à la compression suffisante. Au milieu de la cure sèche (21 jours après la coulée de la plaque) la digue est placée. La solution saline est versée sur l'éprouvette sur une hauteur d'environ  $5 \pm 2 \text{ mm}$  28 jours après la réalisation du béton. La plaque est maintenue en milieu ambiant pendant 7 jours après l'application de la solution saline avant de démarrer les cycles de gel-dégel [27].

Par la suite, les éprouvettes sont placées dans le congélateur avec un dégagement minimal de 30 mm. Celui-ci doit être tel que la surface du béton en contact avec la solution soit à une température de  $-18 \pm 3^\circ\text{C}$  lors des 7 à 10 dernières heures de la période de refroidissement et supérieure ou égale à  $5^\circ\text{C}$  à la fin de la période de réchauffement. La phase de refroidissement doit durer  $16 \pm 1 \text{ h}$  et la phase de réchauffement  $8 \pm 1 \text{ h}$  pour une durée totale de 24 h [26].

La mesure des résidus d'écaillage est effectuée après 5, 15, 30 et 50 cycles ou après 7, 21, 35 et 56 cycles lors de l'utilisation d'un appareil automatisé. La surface de l'éprouvette est rincée avec une nouvelle solution saline, et les résidus sont récupérés sur un papier filtre, puis placés dans une étuve à  $110^\circ\text{C}$  et enfin pesés. Entre chaque cycle, il peut être

nécessaire de rajouter de l'eau salée. De plus, après chaque mesure, la solution saline doit être remplacée par une solution fraîche.

L'interprétation visuelle des résultats se fait après chaque mesure, selon le tableau 2.8, tiré de la norme BNQ 2621-905/2018 Annexe B [27]. Cette méthode d'analyse visuelle formera une partie de l'objet de la recherche présentée.

**TABLEAU 2.8 – Caractéristique d'une surface écaillée – mortier de surface [27]**

<b>Cote</b>	<b>Portion de la surface écaillée — mortier de surface</b>	<b>État de la surface</b>
0	$\leq 1 \%$	Aucun écaillage du mortier de surface
1	$> 1 \%$ et $\leq 5 \%$	Écaillage très léger du mortier de surface
2	$> 5 \%$ et $\leq 10 \%$	Écaillage modéré du mortier de surface
3	$> 10 \%$ et $\leq 30 \%$	Écaillage important du mortier de surface
4	$> 30 \%$ et $\leq 50 \%$	Écaillage sévère du mortier de surface
5	$> 50 \%$	Écaillage très sévère du mortier de surface
NOTE — Le pourcentage de surface écaillée associée au mortier de surface est à titre indicatif seulement.		

L'endommagement des gros granulats à la surface d'un béton soumis à un essai d'écaillage a été étudié par Morin-Morissette [19]. Un éclatement sera considéré comme un « pop-out » s'il satisfait l'un des critères suivants :

1. Des feuillets détachés de la surface du granulat sont visibles dans la zone endommagée (figure 2.22) ;



**FIGURE 2.22 - Présence de feuillets en surface due à un « pop-out » [19]**

2. Le volume interne du granulat de la zone endommagée a été fracturé ou délaminé (figure 2.23) ;



**FIGURE 2.23 - Fracture visible d'un granulat [19]**

3. La présence d'un cône d'arrachement dont le fond révèle un granulat nettement délaminé en surface (figure 2.24) ;



FIGURE 2.24 - Cône de pâte détachée et fracture visible à la surface du granulat [19]

4. Un granulat exposé et présentant des signes de ruptures doit avoir un diamètre en surface d'au moins 5mm.

### **2.3.5 EXIGENCES NORMATIVES POUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GROS GRANULATS**

Le tableau 2.9 présente les limites de substances nuisibles et des propriétés physiques des granulats pour béton selon le tableau 12 de la norme CSA A23.1 [17]. Pour les gros granulats, les limites varient en fonction des conditions d'exposition. Dans le cas d'un béton exposé au gel-dégel, les pertes maximales à l'essai Micro Deval et à l'essai de gel-dégel non confiné sont respectivement de 17 % et 6 %. Cependant, ces limites peuvent être différentes dans le cas particulier de certains granulats tels que le calcaire et les dolomies des Basses-terres du Saint-Laurent. Ainsi, pour le gel-dégel non confiné, la limite de 6 % peut être augmentée à 9 % pour les bétons exposés au gel. Pour l'essai Micro Deval, la limite maximale de 17 % peut être augmentée à 19 %.

Globalement, ces exigences de performance tirées du tableau 12 de la norme CSA A23.1, montrent que certaines caractéristiques intrinsèques des gros granulats (Micro Deval et gel-dégel non confiné) peuvent avoir un impact très significatif sur la durabilité au gel des bétons exposés au climat canadien.

Au Québec, la durabilité à l'écaillage du béton est évaluée à l'aide de la procédure d'essai normalisée présentée à l'annexe B de la norme BNQ 2621-905 [27]. Selon cette norme, le critère de performance à l'écaillage impose une masse maximale des débris de  $500 \text{ g/m}^2$  après 56 cycles de gel-dégel. L'endommagement des granulats (« pop-out ») n'est pas spécifiquement mesuré par cette procédure d'essai. Il n'y a pas non plus de valeur limite maximale imposée pour les éclatements. L'endommagement des granulats n'est évalué que qualitativement à l'aide de grilles visuelles présentées au tableau 2 de l'annexe B de la norme BNQ 2621-905 (tableau 2.10).

TABLEAU 2.9 - Limites de substances nuisibles\* et propriétés physiques des granulats [20] [24]

Méthode d'essai de la CSA	Propriété	Pourcentage maximal de la masse totale de l'échantillon		
		Granulat fin	Gros granulat	
			Béton soumis au gel-dégel	Autres conditions d'exposition
	Exigences fondamentales			
A23.2-3A	Mottes d'argile†*****	1,0	0,3	0,5
A23.2-4A	Constituants granulaires de faible densité‡*****	0,5	0,5	1
A23.2-5A	Particules fines passant le tamis de 80 µm	3,0§	1,0**	1,0**
A23.2-13A	Particules plates et allongées	—	20	20
	Procédure A, rapport 4:1, ou			
	Procédure B	—	25	25
	Particules plates	—	45	45
	Particules allongées	—	40	40
	Particules allongées (chaussées et bétons à haute performance)			
A23.2-23A	Essai micro-Deval††	20	17	21
A23.2-29A				
A23.2-24A	Essai de gel-dégel non confiné‡‡	—	6	10
A23.2-16A	Perte à l'impact et à l'abrasion§§	—	50	50
A23.2-17A				
	Exigences alternatives***			
A23.2-9A	Perte à l'essai MgSO <sub>4</sub>	16	12	18

\*Les limites de substances nuisibles, non répertoriées dans ce tableau telles que le charbon, l'ocre (roche ferrugineuse), le shale, le siltstone ou le calcaire argileux doivent être spécifiées par le maître d'ouvrage de façon à englober toutes les substances nuisibles connues existant dans une région donnée. En l'absence de ces renseignements, les granulats seront acceptés ou refusés selon l'article 4.2.3.9.

†On entend par mottes d'argile les substances sédimentaires fines, consolidées d'aluminosilicates aqueux.

‡On utilise habituellement un liquide ayant une densité relative de 2,0 pour séparer les particules de charbon ou de lignite. Des liquides de densité relative supérieure ou inférieure à 2,0 pourraient être nécessaires pour l'identification d'autres substances nuisibles de densité inférieure.

§Cette limite peut être portée à 5 % si le matériau argileux (particules de moins de 2 µm) ne représente pas plus de 1 % de la totalité de l'échantillon de granulat fin. La quantité de constituants de la dimension de l'argile doit être déterminée par analyse hydrométrique, conformément à la ASTM D422, sur un échantillon lavé sur un tamis de 80 µm.

\*\*Dans le cas du granulat concassé, si les particules passant le tamis de 80 µm sont constituées de poussière de concassage essentiellement exempte d'argile ou de shale, cette limite peut être portée à 2,0 %.

†† CSA A23.2-23A est une méthode d'essai du granulat fin rapide et extrêmement précise. De plus, elle présente une étroite corrélation avec l'essai de résistance à la désagrégation par le MgSO<sub>4</sub>. Pour plus de renseignements, voir Rogers, Bailey et Price (1991).

‡‡ CSA A23.2-24A est une méthode d'essai du gros granulat offrant une bonne précision et une corrélation acceptable avec l'essai de résistance à la désagrégation par le MgSO<sub>4</sub>. Pour plus de renseignements, voir Rogers, Senior et Boothe (1989).



§§La perte due à l'abrasion ne doit pas dépasser 35 % lorsque le granulat est utilisé pour la construction de chaussées en béton ou d'autres surfaces exposées à une usure importante. Cette restriction ne s'applique pas au granulat de laitier de haut-fourneau refroidi à l'air. On peut déroger aux exigences de perte due à l'abrasion pour le gros granulat dans la mesure où le matériau satisfait aux autres exigences de l'essai micro-Deval indiquées à ce tableau.

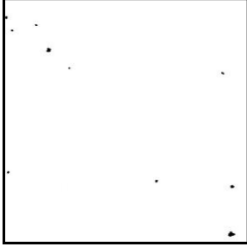

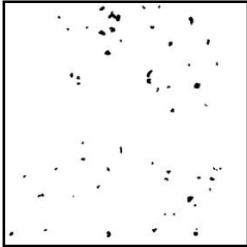
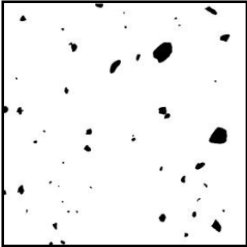


\*\*\*On peut déroger aux exigences de l'essai micro-Deval applicables au granulat fin ou aux exigences de résistance au gel-dégel du gros granulat dans la mesure où le matériau satisfait aux autres exigences de perte à l'essai  $\text{MgSO}_4$  indiquées à ce tableau.

\*\*\*\*\*Si le gros granulat testé selon la A23.2-15A n'indique pas la présence de mottes d'argile ou de constituants granulaires de faible densité, les exigences de l'essai selon 3A et 4A peuvent être omises.

**Notes :**

- 1) Voir l'article 4.2.3.9 pour la fissuration par dégradation (D-cracking).
- 2) On a constaté que pour certains granulats, tels que le calcaire et les dolomites des Basses-terres du Saint-Laurent, la limite de 9 plutôt que 6 pour le béton soumis au gel-dégel plutôt que 6 était satisfaisante pour les classes d'exposition F-1, C-XL, C-1 et C-2, ainsi que la limite de 13 plutôt que 10, dans le cas d'autres conditions d'exposition (voir l'article 4.2.3.10.3).
- 3) On a constaté que pour certains granulats, tels que le calcaire et les dolomites des Basses-terres du Saint-Laurent, la limite de 19 plutôt que 17 à l'essai micro-Deval était satisfaisante pour les classes d'exposition F-1, C-XL, C-1 et C-2 (voir l'article 4.2.3.10.3). Ces limites plus élevées seront seulement acceptées si les producteurs de granulats peuvent démontrer que la production annuelle présente moins de 2,0 % de matériaux nuisibles (argileux), selon la détermination de la CSA A23.2-15A.
- 4) En ce qui concerne les notes 2 et 3, voir le rapport d'Alain Blanchette (2004) et (2006) par le RPPG (Regroupement professionnel des producteurs de granulats du Québec), afin d'obtenir de plus amples renseignements sur les calcaires et les dolomites des Basses-terres du Saint-Laurent.
- 5) Le maître d'ouvrage doit spécifier la procédure A ou la procédure B pour la détermination de la forme des particules des gros granulats.
- 6) Si les limites d'usure à l'appareil Micro-Deval du tableau 12 pour le granulat fin sont respectées, il n'est pas nécessaire de procéder aux essais visant les mottes d'argile et les matériaux granulaires de faible densité.

TABLEAU 2.10 - Caractéristique d'une surface écaillée - cône d'éclatement [27]

Cote	Charte visuelle	Portion de la surface écaillée — cônes d'éclatement	État de la surface
A	<div>0,13 %</div>  <div>0,95 %</div> 	$\leq 1 \%$	Aucun ou peu de cônes d'éclatement en surface
B	<div>1,02 %</div>  <div>2,42 %</div> 	$> 1 \%$ et $\leq 2,5 \%$	Présence faible à modérée de cônes d'éclatement en surface
C	<div>2,54 %</div>  <div>5,98 %</div> 	$> 2,5 \%$	Présence importante et sévère de cônes d'éclatement en surface
<p>NOTES —</p> <p>1 Cône d'éclatement (<i>popout</i>) : cavité en forme de cratère résultant de l'éclatement d'un granulat à la surface du béton. La dimension de ce cratère varie en fonction de la dimension des granulats. Une partie du granulat éclaté doit être observée au fond de ce cratère.</p> <p>2 La charte visuelle ainsi que la portion de surface écaillée associée aux cônes d'éclatement sont à titre indicatif seulement.</p>			

# **Chapitre 3 : BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL**

## **3.1 CONTEXTE GLOBAL DU PROJET ET PROBLEMATIQUE**

La durabilité des ouvrages en béton est une préoccupation constante pour le MTQ (Ministère des Transports du Québec). Les conditions hivernales rigoureuses du Québec occasionnent des problématiques complexes en relation avec la technologie du béton. Parmi celles-ci, il est possible de retrouver l'écaillage. Des projets ont permis d'appuyer les critères de durabilité exigés concernant le réseau d'air de la pâte de ciment. Il a aussi été démontré que la qualité des granulats utilisés dans la fabrication du béton peut avoir un effet significatif sur l'endommagement du béton exposé à des cycles de gel-dégel en présence de sels de déglacage [18]. L'endommagement causé par l'écaillage entraîne plusieurs conséquences qui peuvent s'accumuler :

- Esthétiques car l'éclatement des granulats et du mortier diminue significativement les qualités visuelles des surfaces de béton ;
- Fonctionnelles car l'éclatement des granulats peut s'ajouter à l'endommagement du mortier, ce qui contribue à augmenter l'écaillage, la rugosité de la surface et diminue l'épaisseur de l'enrobage des aciers d'armature (si présents).

Différentes sources granulaires du Québec ont été utilisées afin de permettre d'étudier les granulats produits et en déduire les performances de béton les utilisant. Grâce à cet éventail de pierres ayant des caractéristiques diverses, les performances des bétons vis-à-vis de l'écaillage pourront alors être caractérisées. De plus, ce projet a pour intérêt de vérifier la précision et la répétabilité de l'essai d'écaillage selon la norme BNQ 2621-905 Annexe B, qui sont encore à approfondir.

### 3.2 OBJECTIFS

Le projet a comme objectif principal de déterminer l'influence de certaines caractéristiques physico-chimiques des gros granulats sur l'endommagement de bétons subissant des cycles de gel-dégel en présence de sels déglacants (e.g. éclatements et dégarnissements) lorsqu'ils sont utilisés dans des bétons subissant des cycles de gel-dégel et en présence de sels de déglacage. Plus spécifiquement, l'étude souhaite déterminer s'il existe une relation entre les pertes à l'essai Micro Deval et à l'essai de gel-dégel non confiné et la susceptibilité du gros granulat à l'éclatement et au dégarnissement lors de l'essai d'écaillage en laboratoire selon la procédure normalisée BNQ 2621-905 Annexe B. L'analyse de la corrélation entre la réponse de ces deux essais (Micro Deval et gel-dégel non confiné) et la durabilité à l'écaillage du béton permettra de déterminer s'il est pertinent d'autoriser ou refuser l'usage d'un gros granulat sur la base de sa performance lorsqu'il est soumis à l'essai Micro Deval et/ou à l'essai de gel-dégel non confiné. Dans l'affirmative, les résultats de cette étude pourront être utilisés pour contribuer à définir les limites maximales autorisées lorsqu'un gros granulat est utilisé dans un béton soumis à des cycles de gel-dégel en présence de sels de déglacage.

Pour atteindre cet objectif principal, cette étude comporte les objectifs spécifiques suivants :

- Caractériser l'ensemble des sources granulaires au niveau des caractéristiques de fabrication et des propriétés intrinsèques ;
- Perfectionner une procédure expérimentale et une méthode d'analyse pour caractériser l'endommagement des particules de gros granulat (éclatement, dégarnissement) lors d'un essai d'écaillage en laboratoire. Cet objectif comportera notamment la définition des critères visuels permettant d'identifier un dégarnissement et un éclatement. La variabilité de la procédure sera aussi étudiée ;
- À partir de sept sources granulaires, quantifier leur susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement en fonction des paramètres suivants (les phases définies sont expliquées au paragraphe suivant) :

- Pertes à l'essai Micro Deval (phase1) ;
- Pertes à l'essai de gel-dégel non confiné (phase 1) ;
- Dimension maximale nominale du gros granulat : 5 – 20 et 5 – 14 mm (phases 1 et 2) ;
- Type de matrice de béton : V-S, XIII et F2 (phase 1, 3 et 4) ;
- Facteur d'espacement des bulles d'air (phase 5) ;
- Présence/absence de géotextile en fond de moule (phase 6).

### **3.3 METHODOLOGIE**

Afin d'atteindre les objectifs de ce projet, un important programme expérimental a été conçu et mis en œuvre à partir du mois de mai 2018. Il a débuté par l'identification et l'échantillonnage de 17 sources granulaires représentatives des gros granulats communément utilisés par la production des bétons au Québec. Ces sources seront choisies pour inclure l'essentiel des faciès minéralogiques des gros granulats à béton du Québec (calcaires, dolomies, granites, basaltes). Ces dernières ont ensuite fait l'objet d'une caractérisation détaillée.

L'étude de l'influence des caractéristiques des gros granulats sur la durabilité à l'écaillage du béton a ensuite été accomplie à l'aide des six phases de travail suivantes :

- Phase 1 : Béton de type V-S avec granulat 5 – 20 mm ;
- Phase 2 : Béton de type V-S avec granulat 5 – 14 mm ;
- Phase 3 : Béton de type XIII avec granulat 5 – 14 mm ;
- Phase 4 : Béton de type F2 avec granulat 5 – 20 mm ;
- Phase 5 : Béton de type V-S avec variation du facteur d'espacement ;
- Phase 6 : Influence du géotextile en fond de moule.

Les paragraphes qui suivent décrivent plus en détails les objectifs et les variables étudiées dans chacune de ces phases.

### **3.3.1 ÉCHANTILLONNAGE DES GRANULATS**

Les 17 sources granulaires ont été sélectionnées et échantillonnées au cours de l'été 2018. Elles ont été choisies en fonction de certaines caractéristiques intrinsèques déjà connues par le MTQ : minéralogie, Micro Deval, gel-dégel non confiné. La localisation géographique, les calibres disponibles et l'état de la carrière d'exploitation ont également été pris en compte. Afin de respecter la confidentialité des entreprises qui ont accepté de nous donner accès à ces sources granulaires, aucune d'entre elles ne sera nommée dans ce mémoire. Elles seront identifiées par des numéros allant de 1 à 17.

L'Université de Sherbrooke, l'Université de Laval et le MTQ ont conjointement participé au processus de sélection de ces sources granulaires. Chacun des échantillonnages a été effectué selon la procédure LC 21-010 en présence des trois parties participantes au projet.

Cinq sorties ont été requises pour réaliser l'échantillonnage complet de toutes les carrières. Deux barils de 300 kg environ (pour chaque université) et six sacs pour un total de 100 kg environ (pour le MTQ) ont été prélevés dans chaque source.

La majorité des sources possède une classe granulaire 5-20 mm, à l'exception des sources 3 (divisée en calibre [5-14] mm et [10-20] mm), 5 (divisée en calibre [5-10] mm et [10-20] mm), 9 (calibre [5-14] mm), 10 (mélanges de plusieurs calibres) et 16 (calibre [5-14] mm).

### **3.3.2 CARACTERISATION DES SOURCES GRANULAIRES**

Suite à l'échantillonnage, deux laboratoires mandatés par le MTQ ont effectué la caractérisation des 17 sources granulaires en mars 2019 (réalisation des essais de gel-dégel non confiné et des essais Micro Deval). Cette caractérisation a également été réalisée en interne par l'Université de Laval (partenaire du projet de recherche) et le MTQ.

Pour les 17 sources, les essais suivants ont été réalisés par les intervenants précédemment cités :

- Gel-dégel non confiné ;

- Micro Deval ;
- $MgSO_4$  ;
- Los Angeles ;
- Analyse pétrographique ;
- Mesures des particules fines, légères, friables, plates et allongées ;
- Granulométrie.

Sur la base des résultats des essais de gel-dégel non confiné et de Micro Deval, les 17 sources granulaires ont été regroupées selon trois catégories :

- Catégorie 1 : propriétés intrinsèques supérieures (sources granulaires 2, 4, 5, 7, 12, 15 et 17) ;
- Catégorie 2 : propriétés intrinsèques intermédiaires (sources granulaires 3, 9, 10, 11, 13 et 14) ;
- Catégorie 3 : propriétés intrinsèques inférieures (sources granulaires 1, 6, 8 et 16).

### **3.3.3 PHASE 1 : BÉTON DE TYPE V-S AVEC GRANULATS 5-20 MM**

Le but de la phase 1 est d'étudier la relation entre la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement des particules de gros granulat et les réponses aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné. Dans un premier temps, sept sources ont été choisies afin d'atteindre cet objectif. Elles comprennent deux sources de catégorie 1 (2 et 12), trois sources de catégorie 2 (3, 11 et 14) et deux sources de catégorie 3 (1 et 8). Compte tenu des ressources et de l'échéancier prévus pour cette étude, il a été nécessaire de limiter l'ampleur de la phase 1 à ce sous-ensemble de sept sources granulaires. Pour chacune des trois catégories précédentes, le choix des sources granulaires a été effectué en s'assurant de bien refléter la diversité des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des granulats à béton produits au Québec.

Les bétons de cette phase 1 sont formulés selon les exigences d'un béton de Type V-S présenté au tableau 3.1. Tous les bétons ont été fabriqués avec un liant ternaire de type GUb-S/SF. Le dosage en liant est de 385 kg/m<sup>3</sup> pour tous les bétons. Les caractéristiques détaillées de chacun des gros granulats utilisés pour cette recherche sont présentées au paragraphe 4.1. Un superplastifiant (SP) de type polynaphtalène sulfonate et un agent entraîneur d'air (AEA) sont utilisés dans tous les bétons. Les dosages en SP et AEA varient entre chaque gâchée afin d'obtenir un affaissement de 130 ± 30 mm, un volume d'air compris entre 5 et 8 % ce qui devrait permettre d'obtenir un facteur d'espacement inférieur à 230 µm.

TABLEAU 3.1 – Caractéristiques de formulation des bétons de type V-S de la phase 1

Propriétés	Unités	Valeurs
Type de liant	-	GUb-S/SF
f'c à 28 jours	MPa	35
Masse de liant	kg/m <sup>3</sup>	385
Eau/liant	-	0,40
Calibre du gros granulats	mm	5-20
Teneur en air	%	5 à 8
Affaissement	mm	130 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230
Type de superplastifiant	-	Polynaphtalène

Pour les bétons de la phase, trois paires de plaques d'écaillage ont été produites pour permettre l'étude de l'influence des variations de température dans la chambre froide, soit une paire à gauche, une paire au centre et une paire à droite. Toutes les plaques d'écaillage ont subi le même mûrissement prescrit par la procédure d'essai BNQ 2621-905 Annexe B :

- 24 heures de conservation dans le moule avec protection contre l'évaporation ;
- 13 jours de conservation dans une chambre humide à 100 % d'humidité ;
- 14 jours de séchage à l'air dans le laboratoire ;
- 7 jours de présaturation avec la solution saline.



La masse de débris, la caractérisation des dégarnissements et éclatements et une photo de la surface exposée ont été prises après 0, 7, 21, 35 et 56 de gel-dégel, tel que spécifié dans la norme BNQ 2621-905 Annexe B.

Pour chaque béton, sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués. Six cylindres seront utilisés pour mesurer la résistance à la compression à 7 et 28 jours (selon la norme CSA A23.2-9C). Le dernier sera utilisé pour déterminer les caractéristiques du réseau d'air entraîné (selon la norme ASTM C456).

### **3.3.4 PHASE 2 : BÉTON DE TYPE V-S AVEC GRANULATS 5-14 MM**

Cette phase a pour but de reproduire la formulation de la phase précédente en ne changeant qu'un paramètre : le calibre des gros granulats. Ainsi, au lieu d'un calibre 5-20 mm, les gros granulats seront tamisés afin d'obtenir un calibre 5-14 mm. Les sources granulaires de la phase 2 sont : 1, 3, 8 et 11.

Le programme de la phase 2 comporte quatre bétons fabriqués avec les granulats de catégories 2 et 3. Les deux sources granulaires de la catégorie 1 n'ont pas été utilisés car il a été estimé que l'influence de la taille des particules serait vraisemblablement négligeable compte tenu du très bon potentiel de durabilité de ces deux sources. Le tableau 3.2 présente les propriétés de la formulation des bétons de la phase 2.

TABLEAU 3.2 – Caractéristiques de formulation des bétons de type V-S de la phase 2

Propriétés	Unités	Valeurs
Type de liants	-	GUb-S/SF
f'c à 28 jours	MPa	35
Masse de liant	kg/m <sup>3</sup>	385
Eau/liant	-	0,40
Calibre du gros granulats	mm	5-14
Teneur en air	%	5 à 8
Affaissement	mm	130 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230
Type de superplastifiant	-	Polynaphtalène

Comme pour la phase précédente, sept cylindres (100 x 200 mm) ont été fabriqués pour chaque gâchée : six pour les essais de résistance à la compression à 7 et 28 jours et un pour la mesure des caractéristiques du réseau de bulles d'air.

### **3.3.5 PHASE 3 : BÉTON DE TYPE XIII AVEC GRANULATS 5-14 MM**

La phase 3 a pour objectif d'étudier l'influence d'une matrice de béton à haute performance (Type XIII) sur la susceptibilité des gros granulats à l'éclatement et au dégarnissement. Elle comporte deux bétons fabriqués avec les deux sources granulaires (1 et 8) de la catégorie 3. Ces deux granulats de la catégorie inférieure ont été choisis afin de mieux mettre en évidence l'effet potentiellement favorable d'une matrice à haute performance sur la durabilité des particules de gros granulat.

Les bétons sont formulés selon les exigences pour le type XIII (MTQ) en utilisant 430 kg/m<sup>3</sup> de liant Gub-S/SF. Le calibre des gros granulats est 5 – 14 mm. Les dosages de l'AEA et du SP ont été ajustés pour obtenir 5 à 8 % d'air et un affaissement de 170 ± 30 mm. Le tableau 3.3 présente les principales caractéristiques des bétons de la phase 3.

TABLEAU 3.3 – Caractéristiques de formulation des bétons de type XIII de la phase 3

Propriétés	Unités	Valeurs
Type de liants	-	GUb-S/SF
f'c à 28 jours	MPa	50
Masse de liant	kg/m <sup>3</sup>	430
Eau/liant	-	0,36
Calibre du gros granulats	mm	5-14
Teneur en air	%	5 à 8
Affaissement	mm	170 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230
Type de superplastifiant	-	Polynaphtalène

Une paire de plaques d'écaillage et sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués pour les essais d'écaillage, de résistance à la compression et pour la mesure des caractéristiques du réseau d'air.

### **3.3.6 PHASE 4 : BÉTON DE CLASSE F2 AVEC GRANULATS 5-20 MM**

La phase 4 a pour objectif d'étudier l'influence d'une matrice à plus faible performance (classe F2 de la norme CSA A23.1) sur la susceptibilité des gros granulats à l'éclatement et au dégarnissement. Elle comporte deux bétons fabriqués avec les deux sources granulaires de la catégorie la moins performante (sources 1 et 8). Ces deux granulats ont été choisis pour mieux mettre en évidence l'effet potentiellement défavorable d'une matrice de plus faible durabilité à l'écaillage.

Les bétons sont formulés selon les critères de la classe d'exposition F2 de la norme CSA A23.1 en utilisant 300 kg/m<sup>3</sup> de liant de type GU. Les dosages en AEA et en SP ont été ajustés afin d'obtenir 4 à 7 % d'air et un affaissement de 80 ± 30 mm. Le tableau 3.4 présente les caractéristiques des bétons de la phase 4.

TABLEAU 3.4 – Caractéristiques de formulation des bétons de classe F2 de la phase 4

Propriétés	Unités	Valeurs
Type de liants	-	GU
f'c à 28 jours	MPa	25
Masse de liant	kg/m <sup>3</sup>	300
Eau/liant	-	0,55
Calibre du gros granulats	mm	5-20
Teneur en air	%	4 à 7
Affaissement	mm	80 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230
Type de réducteur d'eau	-	Lignosulfonate

Une paire de plaques d'écaillage et sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués pour les essais d'écaillage, de résistance à la compression et pour la mesure des caractéristiques du réseau d'air.

### **3.3.7 PHASE 5 : INFLUENCE DU FACTEUR D'ESPACEMENT (BÉTON V-S)**

La phase 5 a pour objectif d'étudier l'influence d'une variation du facteur d'espacement sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat. Elle comporte deux bétons formulés avec une matrice de type V-S et avec la source granulaire 11 de la catégorie 2 (intermédiaire).

Le dosage de l'AEA a été ajusté pour produire les facteurs d'espacement suivants : inférieur à 230  $\mu\text{m}$ , compris entre 250 et 350  $\mu\text{m}$  et supérieur à 350  $\mu\text{m}$ . Il est à noter que le béton avec un facteur d'espacement inférieur à 230  $\mu\text{m}$  provient de la phase 1 (matrice V-S, calibre 5 – 20 mm, source 11,  $\bar{L}$  de 96  $\mu\text{m}$ ) car il a été produit avec la même source granulaire (11) et la même matrice de béton (V-S).

Les deux bétons de cette phase ont été produits avec 385  $\text{kg/m}^3$  de liant GUb-S/SF et un gros granulat de calibre 5 – 20 mm. Le dosage en SP a été ajusté pour obtenir un affaissement de  $130 \pm 30$  mm. Le tableau 3.5 présente les caractéristiques des bétons de la phase 5.

TABLEAU 3.5 – Caractéristiques de formulation des bétons de type V-S de la phase 5

Propriétés	Unités	Valeurs
Type de liants	-	GUb-S/SF
f'c à 28 jours	MPa	35
Masse de liant	$\text{kg/m}^3$	385
Eau/liant	-	0,40
Calibre du gros granulats	mm	5-20
Teneur en air	%	-
Affaissement	mm	$130 \pm 30$
$\bar{L}$	$\mu\text{m}$	$250 < \bar{L} < 350$ / $\bar{L} > 350$
Type de superplastifiant	-	Polynaphtalène

Une paire de plaques d'écaillage et sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués pour les essais d'écaillage, de résistance à la compression et pour la mesure des caractéristiques du réseau d'air.

### 3.3.8 PHASE 6 : INFLUENCE DU GEOTEXTILE (BÉTONS DE CLASSE C2)

La phase 6 a pour objectif d'évaluer l'influence du géotextile en fond de moule sur la durabilité à l'écaillage d'un béton formulé selon la classe C2 de la norme CSA A23.2. Elle comporte un béton dont le facteur d'espacement visé est inférieur à 230  $\mu\text{m}$  et un béton dont le facteur d'espacement est compris entre 300 et 350  $\mu\text{m}$ . Pour chaque béton deux paires de plaques d'écaillage sont produites : une paire avec un géotextile et une paire sans géotextile.

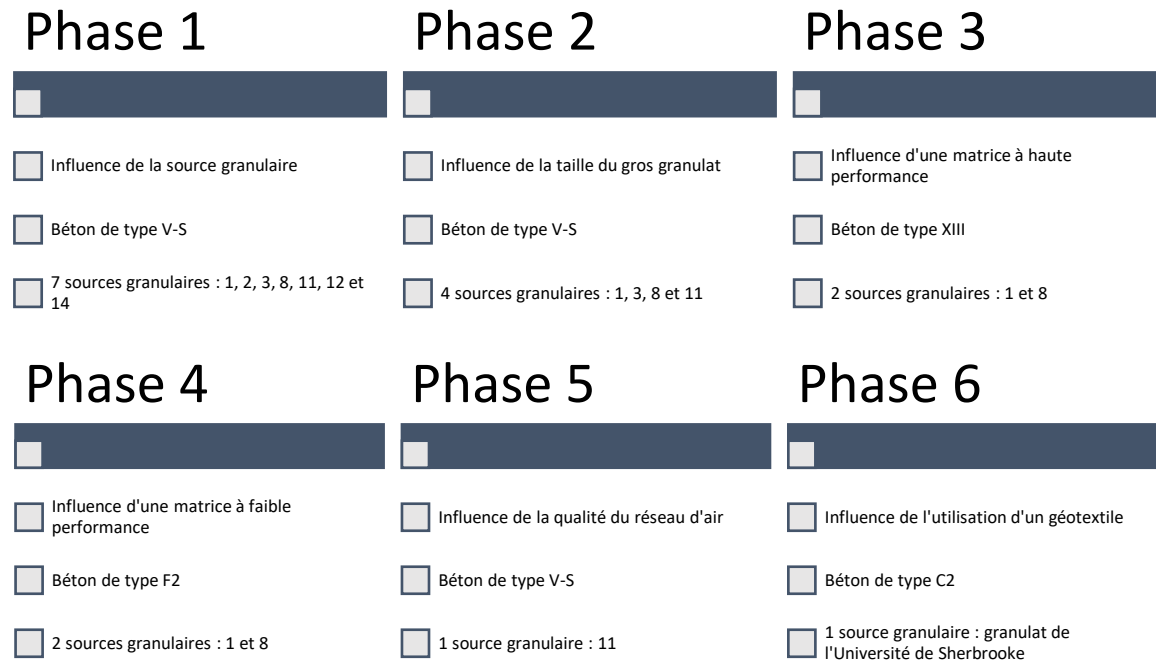
Les bétons sont produits avec 400 kg/m<sup>3</sup> de liant GU et un gros granulat de calibre 5 – 20 mm. Le gros granulat est celui qui est couramment utilisé au laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke. Le tableau 3.6 présente les caractéristiques des bétons de la phase 6.

TABLEAU 3.6 – Caractéristiques de formulation des bétons de classe C2 de la phase 6

Propriétés	Unités	Valeurs
Type de liants	-	GU
f'c à 28 jours	MPa	35
Masse de liant	kg/m <sup>3</sup>	400
Eau/liant	-	0,42
Calibre du gros granulats	mm	5-20
Teneur en air	%	5 à 8
Affaissement	mm	80 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230 / 300 < > 350
Type de réducteur d'eau	-	Lignosulfonate

Une paire de plaques d'écaillage et sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués pour les essais d'écaillage, de résistance à la compression et pour la mesure des caractéristiques du réseau d'air.

La figure 3.1 résume les principales variables testées dans le cadre des six phases expérimentales de cette étude.



**FIGURE 3.1 Résumé du programme expérimental des six phases de recherche**

# **Chapitre 4 : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES**

## **4.1 GROS GRANULATS**

Toutes les sources granulaires (1 à 17) ont fait l'objet d'une caractérisation détaillée. Les sources présentées au paragraphe **3.3.3** sont celles étudiées dans ce projet et présentées dans ce chapitre. Tous les résultats des essais d'absorption et de masse volumique ont été obtenus à l'Université de Sherbrooke. Les autres essais ont été réalisés par le MTQ et deux laboratoires externes.

Parmi les essais de caractérisation, deux sont particulièrement importants : l'essai Micro Deval et l'essai de gel-dégel non confiné. Ces essais sont présentés au paragraphe **2.4**. Le tableau regroupant tous les résultats est présenté au paragraphe **5.1**. Les paragraphes qui suivent présentent certaines caractéristiques de fabrication et certaines propriétés intrinsèques des sept sources granulaires retenues pour les travaux des phases 1 à 6. Les exigences pour les pertes à l'essai Micro Deval et au gel-dégel non confiné proviennent du tableau 12 de la norme CSA A23.1 applicables aux bétons soumis au gel-dégel dans le cas particulier des pierres calcaires et dolomies des Basses-terres du Saint-Laurent (notes 2 et 3 du tableau 12).

#### 4.1.1 SOURCE 1



FIGURE 4.1 - Échantillon de la source 1, fraction 10 - 14 mm [28]

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse et sont généralement cubiques. Quelques particules plates composent également l'échantillon. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à un calcaire de couleur gris à gris foncé. Les principaux faciès composant l'échantillon sont des calcaires à grains fins, des calcaires cristallins fossilifères, des calcaires à plaquage argileux et des calcaires argileux. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) de 145 qui correspond à une qualité physico-mécanique « médiocre » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A2.2 de la norme CSA A23.2-15A suggère que le granulat n'est pas adapté pour la production de béton de ciment [28].



La source 1 est une pierre calcaire. Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,68 et une absorption de 0,85 % (tableau 4.1). Le tableau 4.1 présente les distributions granulométriques obtenues par les trois laboratoires. Les résultats du laboratoire 2 s'écartent légèrement de ceux des deux autres.

TABLEAU 4.1 - Granulométrie, densité et absorption de la pierre 1

		Tamisat cumulé (%)		
		Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3
<b>Ouverture de tamis</b>	28 mm	100	100	100
	20 mm	100	98	99
	14 mm	75	60	71
	10 mm	38	26	38
	5 mm	4	3	3
	2,5 mm	2	2	2
<b>Densité SSS</b>		2,68		
<b>Absorption (%)</b>		0,85		

Les tableaux 4.2 et 4.3 présentent respectivement les résultats aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné. Le tableau 4.2 montre que les pertes massiques maximales évaluées par le Micro Deval sont de 20,8 % et la moyenne est de 18,6 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique à l'abrasion de 19 %). Le tableau 4.3 montre que les pertes massiques maximales évaluées par gel-dégel non confiné sont de 9 % et la moyenne de 7,4 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique au gel-dégel de 9 %).

TABLEAU 4.2 - Résultats de l'essai Micro Deval de la pierre 1

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
20,8	17,7	17,4	18,6	19

TABLEAU 4.3 - Résultats à l'essai de gel-dégel non confiné de la pierre 1

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
7,9	5,3	9	7,4	9

#### 4.1.2 SOURCE 2



FIGURE 4.2 - Échantillon de la source 2, fraction 10 - 14 mm [28]

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre variant de 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse et sont généralement cubiques. Les enduits qui recouvrent les granulats consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Quelques particules ont un aspect rouillé. Le granulat est une roche plutonique, présentant parfois une foliation métamorphique, correspondant à un granite de couleur rosée à noir. Les principaux faciès composant l'échantillon sont des granites, des monzonites, des syénites à quartz, des gabbros ainsi que des diorites. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique de 124 qui correspond à une « bonne » qualité physico-mécanique pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A2.2 de la norme CSA A23.2-15A suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment [28].

Le tableau 4.4 présente les analyses granulométriques obtenues par les trois laboratoires. Les trois distributions granulométriques sont très similaires, mais l'échantillon testé par le

le laboratoire 3 tend vers un granulat légèrement plus fin. La densité SSS et l'absorption sont respectivement de 2,64 et 0,98 %.

TABLEAU 4.4 - Granulométrie, densité et absorption de la pierre 2

		Tamisat cumulé (%)		
		Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3
Ouverture de tamis	28 mm	100	100	100
	20 mm	98	97	96
	14 mm	66	66	72
	10 mm	42	42	49
	5 mm	13	14	16
	2,5 mm	7	8	9
Densité SSS			2,64	
Absorption (%)			0,98	

Les tableaux 4.5 et 4.6 présentent respectivement les résultats aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné. Le tableau 4.5 montre que les pertes massiques maximales évaluées par le Micro Deval sont de 13,1 % et la moyenne est de 12,4 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique à l'abrasion de 17 %). Le tableau 4.6 montre que les pertes massiques maximales évaluées par gel-dégel non confiné sont de 4,3 % et la moyenne de 3,6 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique au gel-dégel de 6 %).

TABLEAU 4.5 - Résultats de l'essai Micro Deval de la pierre 2

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
12,9	13,1	11,2	12,4	17

TABLEAU 4.6 - Résultats à l'essai de gel-dégel non confiné de la pierre 2

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
3,6	2,8	4,3	3,6	6

#### 4.1.3 SOURCE 3



FIGURE 4.3 - Échantillon de la source 3, fraction 10 - 14 mm [28]

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre de 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme sub-anguleuse à sub-arrondie et sont généralement cubiques. Les enduits qui recouvrent les granulats consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Ce granulat est une roche sédimentaire correspondant à un calcaire de couleur gris à beige. Les principaux faciès composant l'échantillon correspondent à des calcaires cristallins fossilifères, avec en moindre proportions des calcaires fossilifères à grains fins. Quelques particules possèdent un plaquage argileux mince à épais, et certaines particules ont les arrêtes arrondies et un aspect altéré. Ce granulat possède un nombre pétrographique de 122 qui correspond à une

« bonne » qualité physico-mécanique pour la production du béton. Selon le NP, le tableau A2.2 de la norme CSA A23.2-15A suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment [28].

Le granulat provenant de la source 3 a la particularité d'être une combinaison de deux calibres de granulats ([5-14] mm et [10-20] mm). La proportion de chaque calibre pour obtenir une classe [5-20] mm a été vérifiée à l'Université de Sherbrooke et a donné comme résultat : 63 % de [5-14] mm et 37 % de [10-20] mm.

Le tableau 4.7 présente les analyses granulométriques obtenues par les trois laboratoires. La distribution granulométrique testée par le laboratoire 2 présente des écarts par rapport aux deux autres. La densité SSS et l'absorption sont respectivement de 2,68 et 0,55 %.

TABLEAU 4.7 - Granulométrie, densité et absorption de la pierre 3

		Tamisat cumulé (%)		
		Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3
Ouverture de tamis	28 mm	100	100	100
	20 mm	99	96	99
	14 mm	75	67	77
	10 mm	52	45	53
	5 mm	6	5	6
	2,5 mm	4	4	3
Densité SSS			2,68	
Absorption (%)			0,55	

Les tableaux 4.8 et 4.9 présentent respectivement les résultats aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné. Le tableau 4.8 montre que les pertes massiques maximales évaluées par le Micro Deval sont de 20,9 % et la moyenne est de 20,2 %. Ce granulat ne répond pas aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique à l'abrasion de 19 %). Le tableau 4.9 montre que les pertes massiques maximales évaluées par l'essai de gel-dégel non confiné sont de 2,8 % et la moyenne de 2,2 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique au gel-dégel de 9 %).



TABLEAU 4.8 - Résultats de l'essai Micro Deval de la pierre 3

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
20,9	20,1	19,5	20,2	19

TABLEAU 4.9 - Résultats à l'essai de gel-dégel non confiné de la pierre 3

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
2,7	1,2	2,8	2,2	9

#### 4.1.4 SOURCE 8



FIGURE 4.4 - Échantillon de la source 8, fraction 10 -14 mm [28]

Ce granulat se compose d'une pierre concassée d'un calibre variant de 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse et sont généralement cubiques. Les enduits qui recouvrent les granulats sont présents en quantité appréciable et consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat est une roche sédimentaire correspondant à un calcaire de couleur gris foncé. Les principaux faciès composant l'échantillon correspondent à des calcaires fossilifères à grains fins, des calcaires argileux et des calcaires cristallins. Il y est également retrouvé quelques rares particules d'origine volcanique correspondant à un basalte [28]. Ce granulat possède un nombre pétrographique de 158 qui correspond à une qualité physico-mécanique « médiocre » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A2.2 de la norme CSA A23.2-15A suggère que le granulat n'est pas adapté pour la production de béton de ciment [28].

Le tableau 4.10 présente les résultats des analyses granulométriques et les valeurs de densité et absorption. L'analyse granulométrique de l'échantillon testé par le laboratoire 3 correspond à un granulat légèrement plus fin. Il à noter que cette source possède l'absorption la plus élevée parmi les sept sources choisies : 1.41 %.

TABLEAU 4.10 - Granulométrie, densité et absorption de la pierre 8

		Tamisat cumulé (%)		
		Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3
Ouverture de tamis	28 mm	100	100	100
	20 mm	93	91	96
	14 mm	59	56	62
	10 mm	32	30	34
	5 mm	4	5	3
	2,5 mm	3	3	2
Densité SSS		2,67		
Absorption (%)		1,41		

Les tableaux 4.11 et 4.12 présentent respectivement les résultats aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné. Le tableau 4.11 montre que les pertes massiques maximales

évaluées par le Micro Deval sont de 20,2 % et la moyenne est de 19,7 %. Ce granulat ne répond pas aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique à l'abrasion de 19 %). Le tableau 4.12 indique que les pertes massiques maximales évaluées par gel-dégel non confiné sont de 10,5 % et la moyenne de 10,3 %. La valeur du laboratoire 2 n'est pas prise en compte dans le calcul de la moyenne car cette valeur est trop éloignée des deux autres valeurs et est possiblement conséquence d'une erreur. Ce granulat ne répond pas aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique au gel-dégel de 9 %).

TABLEAU 4.11 - Résultats de l'essai Micro Deval de la pierre 8

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
20,2	19,4	19,4	19,7	19

TABLEAU 4.12 - Résultats à l'essai de gel-dégel non confiné de la pierre 8

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
10,5	4,5*	10,1	10,3	9

\*valeur non retenue pour le calcul de la moyenne



#### 4.1.5 SOURCE 11



FIGURE 4.5 - Échantillon de la source 11, fraction 10 - 14 mm [28]

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre variant de 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme sub-anguleuse à sub-arrondies et sont généralement cubiques. Les enduits qui recouvrent les granulats consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat est un roche sédimentaire correspondant à un calcaire de couleur gris foncé à beige. Les principaux faciès composant l'échantillon correspondent à des calcaires cristallins fossilifères, des calcaires à grains fins fossilifères et des calcaires micritiques. Ce gros granulat possède un NP de 137 qui correspond à une qualité physico-mécanique « passable » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A2.2 de la norme CSA A23.2-15A suggère que le granulat n'est pas adapté pour la production de béton de catégorie C1, C2, F1, C-XL, A-XL, A-1 et A-2 [28].

Le tableau 4.13 présente les analyses granulométriques et les valeurs de densité et absorption. La distribution granulométrique de l'échantillon testé par le laboratoire 3 montre que le granulat est très légèrement plus fin que les deux autres.

TABLEAU 4.13 - Granulométrie, densité et absorption de la pierre 11

		Tamisat cumulé (%)		
		Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3
Ouverture de tamis	28 mm	100	100	100
	20 mm	99	97	97
	14 mm	65	68	67
	10 mm	33	34	37
	5 mm	4	5	6
	2,5 mm	2	3	3
Densité SSS			2,7	
Absorption (%)			0,52	

Les tableaux 4.14 et 4.15 présentent respectivement les résultats aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné. Le tableau 4.14 montre que les pertes massiques maximales évaluées par le Micro Deval sont de 15,2 % et la moyenne est de 14,9 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique à l'abrasion de 19 %). Le tableau 4.15 montre que les pertes massiques maximales évaluées par gel-dégel non confiné sont de 11,9 % et la moyenne de 10,2 %. Ce granulat ne répond pas aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique au gel-dégel de 9 %).

TABLEAU 4.14 - Résultats de l'essai Micro Deval de la pierre 11

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
14,8	15,2	14,8	14,9	19

TABLEAU 4.15 - Résultats à l'essai de gel-dégel non confiné de la pierre 11

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
11,4	7,4	11,9	10,2	9

#### 4.1.6 SOURCE 12



FIGURE 4.6 - Échantillon de la source 12, fraction 10 - 14 mm [28]

Ce granulat se compose d'une pierre concassée d'un calibre variant de 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse et sont généralement cubiques. Les enduits qui recouvrent les granulats consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une partie a été éliminée au lavage. Le granulat est une roche sédimentaire correspondant à une dolomie de couleur gris foncé. Les principaux faciès composant l'échantillon correspondent à des dolomies dures à grains fins, avec quelques dolomies à plaquage argileux fin. Quelques particules présentent également des cristaux de dolomite d'une dimension maximale de 3 mm. Ce gros granulat possède un NP de 112 qui correspond à une « bonne » qualité physico-mécanique pour la production du béton. Selon le NP, le tableau A2.2 de la norme CSA A23.2-15A suggère que le granulat est adapté pour la production de béton à ciment [28].

Le tableau 4.16 présente les analyses granulométriques et les valeurs de densité et absorption. La distribution granulométrique de l'échantillon testé par le laboratoire 1 montre que le granulat est légèrement plus fin que les deux autres.

TABLEAU 4.16 - Granulométrie, densité et absorption de la pierre 12

		Tamisat cumulé (%)		
		Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3
Ouverture de tamis	28 mm	100	100	100
	20 mm	99	96	97
	14 mm	64	58	60
	10 mm	48	42	42
	5 mm	9	7	8
	2,5 mm	3	3	3
Densité SSS		2,8		
Absorption (%)		0,62		

Les tableaux 4.17 et 4.18 présentent respectivement les résultats aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné. Le tableau 4.17 montre que les pertes massiques maximales évaluées par le Micro Deval sont de 6,7 % et la moyenne est de 6,4 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique à l'abrasion de 19 %). Le tableau 4.18 montre que les pertes massiques maximales évaluées par gel-dégel non confiné sont de 3,2 % et la moyenne de 3,0 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique au gel-dégel de 9 %).

TABLEAU 4.17 - Résultats de l'essai Micro Deval de la pierre 12

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
6,4	6,7	6,2	6,4	19



TABLEAU 4.18 - Résultats à l'essai de gel-dégel non confiné de la pierre 12

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
3,2	2,5	3,2	3,0	9

#### 4.1.7 SOURCE 14



FIGURE 4.7 - Échantillon de la source 14, fraction 10 - 14 mm [28]

Ce granulat se compose d'une pierre concassée d'un calibre variant de 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse et sont généralement cubiques. Les enduits qui recouvrent les granulats consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat est une roche volcanique correspondant à un basalte de couleur vert à rougeâtre. Le basalte est régulièrement fracturé et les fractures sont remplies de calcite. Dans de nombreux cas, la calcite est présente sur une face entière du granulat ou encore à l'intérieur de fractures dans la particule. Ce gros granulat possède un NP de 103 qui correspond à une « bonne » qualité physico-mécanique pour la production du béton. Selon le NP, le tableau A2.2 de la norme CSA A23.2-15A suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment [28].

Le tableau 4.19 présente les analyses granulométriques et les valeurs de densité et absorption. Les trois distributions présentent des écarts, mais ils sont plus importants pour le laboratoire 2 qui présente le granulat comme moins fin que les deux autres. De plus, l'échantillon testé au laboratoire 1 présente un passant plus important au tamis 20 mm.

TABLEAU 4.19 - Granulométrie, densité et absorption de la pierre 14

		Tamisat cumulé (%)		
		Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3
Ouverture de tamis	28 mm	100	100	100
	20 mm	94	84	81
	14 mm	55	44	57
	10 mm	34	24	37
	5 mm	4	3	5
	2,5 mm	2	1	1
Densité SSS			2,84	
Absorption (%)			1,23	

Les tableaux 4.20 et 4.21 présentent respectivement les résultats aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné. Le tableau 4.20 montre que les pertes massiques maximales évaluées par le Micro Deval sont de 9,2 % et la moyenne est de 8,8 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique à l'abrasion de 17 %). Le tableau 4.21 montre que les pertes massiques maximales évaluées par gel-dégel non confiné sont de 7,4 % et la moyenne de 6,4 %. Ce granulat répond aux exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique au gel-dégel de 6 %).

TABLEAU 4.20 - Résultats de l'essai Micro Deval de la pierre 14

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
8,5	9,2	8,7	8,8	17

TABLEAU 4.21 - Résultats à l'essai de gel-dégel non confiné de la pierre 14

Pertes massiques moyennes (%)				
Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Moyenne	Exigence CSA
7,4	4,9	6,9	6,4	6

#### **4.1.8 SOURCE GRANULAIRE DISPONIBLE A L'UNIVERSITE DE SHERBROOKE**

La source granulaire utilisée couramment dans le laboratoire de l'Université de Sherbrooke est une pierre calcaire concassée. Elle est répartie en deux calibre : 5 - 14 mm et 10 - 20 mm, qui forment le squelette granulaire par l'assemblage de ces fractions (20,8 % de 5 - 14 mm pour 79,2 % de 10 - 20 mm). La densité SSS de ces granulats est comprise entre 2,72 et 2,74. La granulométrie des calibres est présentée dans le tableau 4.22 ci-après.

TABLEAU 4.22 - Granulométrie, densité SSS et absorption du granulat de l'Université de Sherbrooke

		Tamisat cumulé (%)	
		Fraction granulaire 5 – 14 mm	Fraction granulaire 10 – 20 mm
<b>Ouverture de tamis</b>	28 mm	100,0	100,0
	20 mm	100,0	84,0
	14 mm	80,8	24,4
	10 mm	43,3	18,9
	5 mm	4,6	10,7
	2,5 mm	1,4	6,2
<b>Densité SSS</b>		2,74	2,72
<b>Absorption (%)</b>		0,44	0,45

Les pertes massiques par l'essai de Micro Deval ont été évaluées à l'Université de Sherbrooke et sont de 7,0 %, ce qui respecte les exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique à l'abrasion de 19 %).

Les pertes massiques par l'essai de gel-dégel ont également été évaluées à l'Université de Sherbrooke et sont de 5,0 %, ce qui respecte aussi les exigences de la norme CSA A23.1 tableau 12 (limite de perte massique au gel-dégel de 9 %).

#### **4.1.9 CARACTERISATION DES ECLATEMENTS ET DES DEGARNISSEMENTS**

Deux types d'endommagement des particules du gros granulat peuvent survenir lors de l'essai de résistance à l'écaillage du béton : le dégarnissement de la pâte et l'éclatement des particules localisées près de la surface. Cette section a pour but de proposer des critères visuels pour identifier ces deux types de dommage et aussi de décrire une procédure expérimentale pour quantifier ces deux types de dégradation.

Premièrement, il faut définir ce que sont un éclatement (« pop-out ») et un dégarnissement.

##### **Dégarnissement de la pâte de ciment hydratée**

Un dégarnissement d'une particule du gros granulat est défini par la présence d'un cône d'arrachement ou un décollement de la pâte au-dessus (décollement de la pâte) ou à proximité (cône d'arrachement) d'une particule de granulat, mais n'est pas associé à son éclatement. Les figures 4.8 et 4.9 montrent deux exemples de dégarnissement (cercles rouges). Le cercle noir de la figure 4.9 montre l'éclatement consécutif au dégarnissement de la particule du gros granulat.



**FIGURE 4.8 – Exemple du dégarnissement d'une particule du gros granulat sans éclatement**





FIGURE 4.9 - Exemple de degarnissement (cercle rouge) étant apparu avant l'éclatement (cercle noir) d'une particule du gros granulat

### Éclatement (« Pop-out »)

Un éclatement est un endommagement dans la masse de la particule du gros granulat selon un ou plusieurs des mécanismes décrits à la figure 2.10.

La figure 4.10 montre quatre exemples visuels d'éclatements observés durant un essai d'écaillage en laboratoire. L'éclatement indicé A correspond au cas le plus courant. Il s'agit de la délamination par couche progressive du granulat. Cette délamination peut mener au cas B : la disparition totale de la particule de granulat. L'exemple C correspond à une particule de granulat fracturé en profondeur. Enfin, l'exemple D présente un cône d'arrachement de la pâte de ciment hydraté autour d'une particule délaminée.

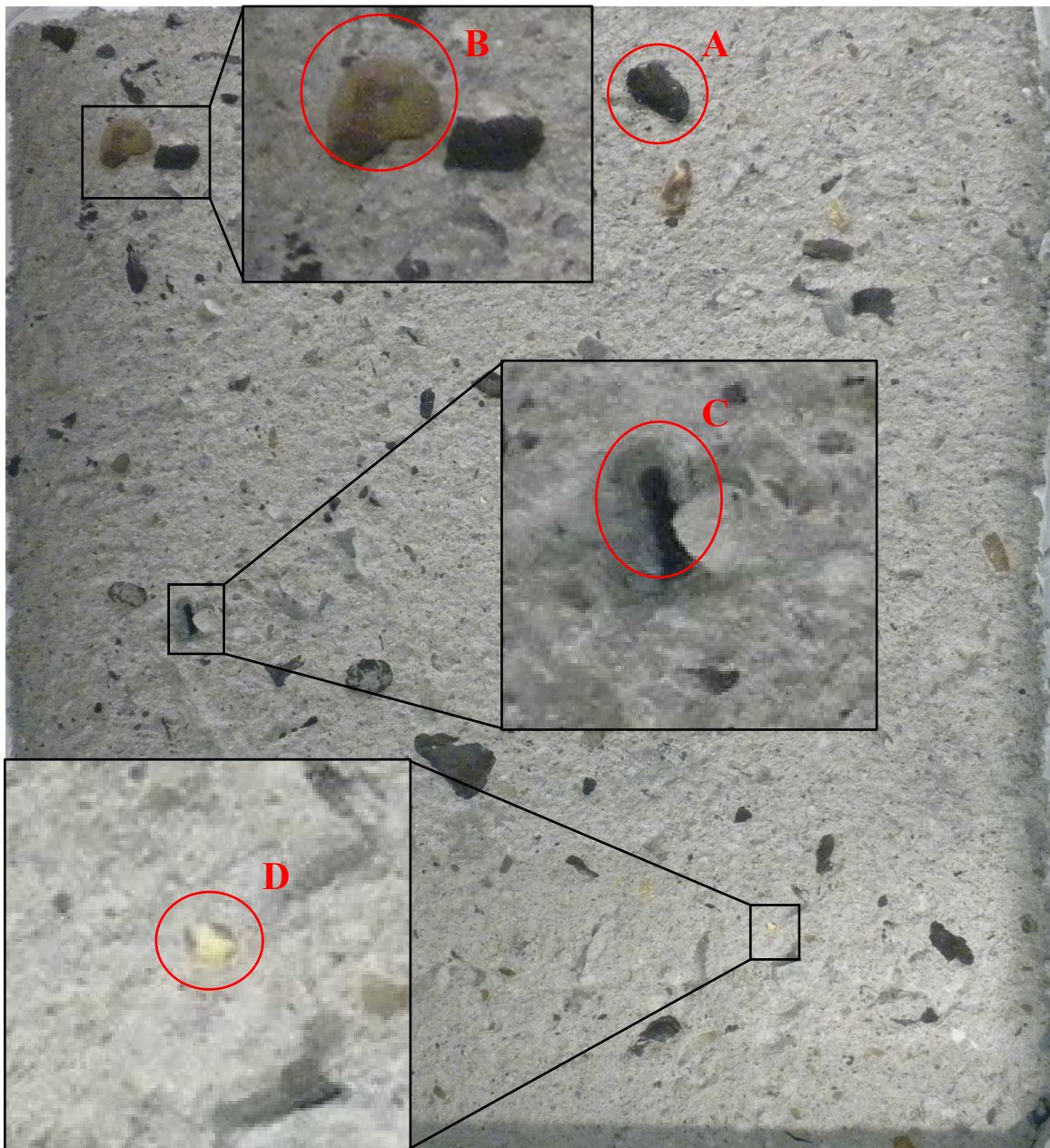


FIGURE 4.10 - Exemples de différents éclatements susceptibles d'apparaître lors de l'essai de résistance à l'éclatement réalisé en laboratoire

### Méthode d'analyse optique

Maintenant que les dégarnissements et les éclatements sont définis, il faut pouvoir les relever et les analyser. La méthode choisie est une méthode optique d'analyse d'images en utilisant un acétate pour relever les éclatements et dégarnissements (figure 4.11). Les figures 4.11 à 4.14 présentent un même béton pour faciliter la compréhension de la méthode. Des couleurs ont été définies pour identifier les éclatements (en noir) et les



dégarnissements (en rouge) afin de faciliter la suite de l'analyse. L'identification de l'acétate est située en bas à droite (couleur verte).



FIGURE 4.11 - Exemple de relevé de « pop-out » et de dégarnissements sur un acétate

Un seul acétate est utilisé pour caractériser l'évolution d'une plaque pendant les 56 cycles. Cela permet d'observer rapidement l'évolution des éclatements et dégarnissements. Ainsi, ce même acétate est modifié à 7, 21, 35 et 56 cycles de gel-dégel. À chaque échéance, l'acétate est déposé sur la surface de béton, préalablement lavée et débarrassée des débris d'écaillage, mais encore à l'état humide. Les éclatements et les dégarnissements sont identifiés visuellement au travers de l'acétate transparent. La surface des dégarnissements est coloriée en rouge à l'aide d'un crayon feutre permanent à pointe fine. La surface des éclatements est coloriée en noir avec un crayon feutre du même type. Lors de l'échéance suivante, de nouveau dégarnissements ou de nouveaux éclatements peuvent apparaître. Des dégarnissements et des éclatements existants peuvent aussi s'agrandir. De plus, il arrive parfois qu'un dégarnissement se transforme en éclatement. La couleur rouge est alors remplacée par la couleur noire.

Après chaque relevé, les acétates sont numérisés (figure 4.12). Pour éviter les erreurs, il est nécessaire de bien nettoyer l'acétate et la vitre du scanneur avant la numérisation. Il faut utiliser une feuille blanche posée sur l'acétate pour produire un fond blanc parfaitement uniforme.



FIGURE 4.12 - Exemple du scan d'un acétate suite au relevé des éclatements et dégarnissements

L'acétate numérisé est analysé par deux macros à l'aide du logiciel ImageJ [29] (annexes 1 et 2). La première, nommée « surf\_eclat », filtre les dégarnissements (en rouge) pour ne laisser apparaître que les éclatements (figure 4.13). L'identification de l'acétate (en vert) est également filtrée pour qu'il ne reste que les éclatements (en noir). Ce filtre procède en trois étapes :

- La première est d'attribuer une valeur à chaque pixel de l'image (le minimum équivaut au noir, le maximum au blanc, et toutes les valeurs intermédiaires

correspondent aux différentes couleurs, selon le même principe que celui utilisé pour les pixels d'un écran Rouge Vert Bleu) ;

- La deuxième est de supprimer tous les pixels dont la valeur est supérieure à celle du noir et leur attribuer la valeur du blanc ;
- Enfin, les zones noires dont la dimension moyenne est inférieure à 5 mm sont également supprimées. Pour cela, le nombre de pixel de chaque zone est comparé au nombre de pixel correspondant à un cercle de diamètre 5 mm, et est filtrée si cette valeur est inférieure.

Les surfaces résiduelles sont dénombrées puis additionnées pour exprimer la surface totale des éclatements en pourcentage de la surface totale de la plaque de béton (ce qui correspond à la surface totale de l'acétate). La figure 4.13 présente un exemple typique de la sortie de la macro « surf\_eclat ».

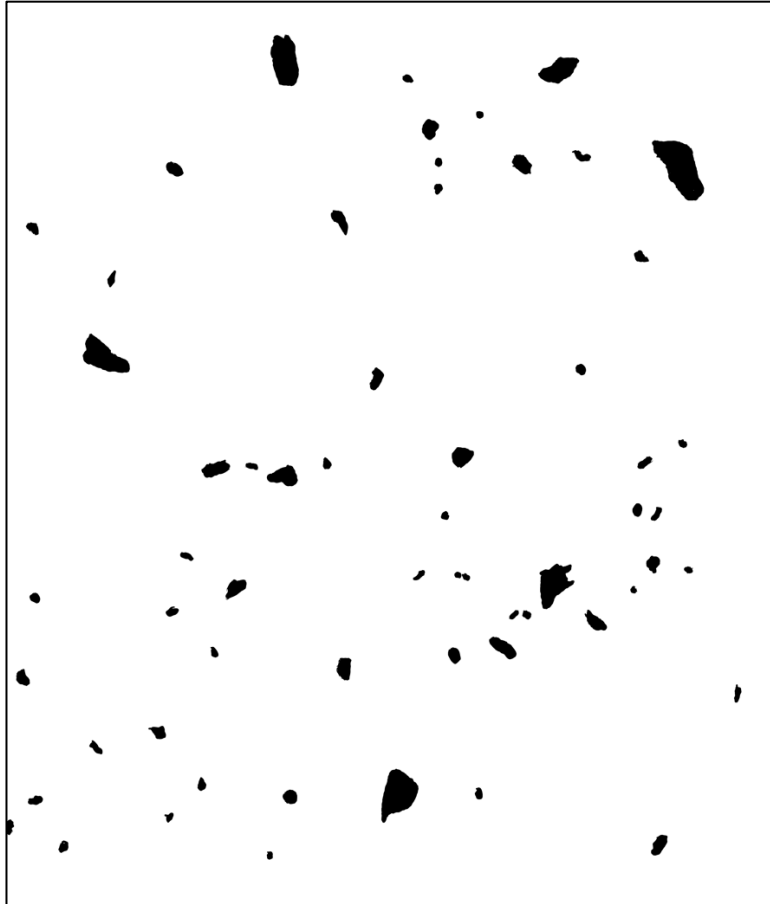


FIGURE 4.13 - Exemple de sortie de la macro « surf\_eclat »

La prochaine étape consiste à utiliser la même numérisation initiale (figure 4.13) mais en la traitant avec la seconde macro « surf\_totale ». Celle-ci ne filtre que le texte d'identification de l'acétate (en vert) et procède de la même manière que celle décrite précédemment en ne retirant que les pixels de couleur verte. De plus, les zones de dégarnissements ou éclatements inférieures à 5 mm sont également filtrées. La figure 4.14 montre un exemple typique de la sortie de la macro « surf\_totale ».



FIGURE 4.14 - Exemple de sortie de la macro « surf\_totale »

La dernière étape consiste à déterminer les dégarnissements en soustrayant numériquement les surfaces éclatées de la surface totale obtenue avec la macro « surf\_totale ». Les éclatements sont exprimés en pourcentage de la surface totale de la plaque de béton (largeur x hauteur en pixels de l'acétate).

## 4.2 GRANULATS FINS

Le granulat fin utilisé lors de cette étude pour produire les bétons est un sable siliceux naturel contenant également des feldspaths provenant de la région de l'Estrie. La densité SSS est comprise entre 2,67 et 2,70. Le pourcentage d'absorption est lui compris entre 0,91 et 1,11.

Le tableau 4.23 présente les résultats de l'analyse granulométrique, le module de finesse, la densité et l'absorption du sable.

TABLEAU 4.23 - Granulométrie, module de finesse, densité SSS et absorption du granulat fin utilisé

		Tamisat cumulé (%)	
		01/19 - 09/19	09/19 - 01/20
<b>Ouverture de tamis</b>	10 mm	100	100
	5 mm	97	99
	2,5 mm	84	85
	1,25 mm	72	71
	0,630 mm	56	56
	0,315 mm	33	30
	0,160 mm	12	7,9
	0,080 mm	5,1	0,1
	< 0,080 mm	4,8	0,0
<b>Module de finesse</b>		2,46	2,47
<b>Densité SSS</b>		2,70	2,67
<b>Absorption (%)</b>		0,91	1,11

### 4.3 LIANTS

Un liant ternaire de type GUb-S/SF a été utilisé pour produire les bétons des phases 1, 2, 3 et 5. Un liant de type GU a été utilisé pour produire les bétons des phases 4 et 6. Pour des raisons de confidentialité, les fiches techniques de ces liants ne sont pas incluses dans ce document.

### 4.4 ADJUVANTS

Les bétons de cette étude ont été produits avec un superplastifiant (SP) de type polynaphtalène sulfonate (PNS), un réducteur d'eau à base de lignosulfonate et un AEA de type synthétique.

### 4.5 MELANGES ET PROCEDURES

#### 4.5.1 PROCEDURE DE GACHAGE

Tous les bétons ont été produits dans un malaxeur à cuve rotative de capacité maximale de 110 L. La même procédure de malaxage a été utilisée pour tous les bétons du projet :



1. Rinçage du malaxeur et introduction du sable ; malaxage de 30 s puis mesure de la teneur en eau. Correction des masses de sable et d'eau si nécessaire ;
2. Introduction de la pierre, malaxage de 30 s ;
3. Introduction de 50 % de l'eau en masse et de l'AEA dilué dans l'eau de gâchage, malaxage de 90 s ;
4. Introduction du liant, malaxage de 30 s ;
5. Ajout de l'eau restante et du SP dilué dans l'eau de gâchage, malaxage de 3 min et 30 s ;
6. Arrêt du malaxeur pendant 1 min ;
7. Reprise du malaxage pendant 3 min ;
8. Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams (CSA A23.2-5C). Si celui-ci correspond à l'intervalle désiré alors prise de mesure de l'air (CSA A23.2-4C). Dans le cas contraire, correction par ajout de SP, reprise du malaxage (3 min) puis réitérer l'étape 8.

#### **4.5.2 ÉCHANTILLONNAGE**

Pour chaque béton, l'échantillonnage comporte sept cylindres de 100 x 200 mm. Ces cylindres ont été remplis en trois couches égales où chacune de ces couches ont été pilonnées 20 fois conformément à la norme CSA A23.2-3C.

En plus, trois séries de deux plaques d'écaillage de 250 x 270 mm ont été échantillonnées pour les bétons de la phase 1 (sauf le béton produit avec la source 2 qui comporte une série de deux plaques de 250 x 270 mm et deux séries de deux plaques de 230 x 305 mm dû au manque de moules de dimension identique) et une série de deux plaques d'écaillage de 250 x 270 mm pour les phases 2 à 6. Ces éprouvettes ont été prélevées selon la norme BNQ 2621-905 Annexe B. Cependant, il est important de noter que dans le cas des bétons des phases 1 à 5, les moules des plaques d'écaillage ne comportent pas de géotextile. Pour les quatre plaques de la phase 6, un géotextile en polypropylène non tissé d'une épaisseur de

7 ± 1 mm et d'une masse surfacique de 900 ± 50 g/m<sup>2</sup> a été déposé au fond du moule. Ce géotextile était sec et n'a jamais été utilisé auparavant. Il a été conservé lors de la cure humide et de la cure sèche puis retiré avant le début de la pré-saturation. Les plaques ont été coulées en une seule couche et consolidées avec un bourroir de 16 ± 1 mm selon un nombre de coups correspondant à 1 par 13 cm<sup>2</sup> de surface de béton. À la fin du pilonnage, la surface a été régaliée pour enlever le surplus de béton avec une barre d'arasement en bois de 20 x 40 x 600 mm. La section de 20 x 40 mm a été utilisée afin de réaliser le surfaçage. La finition était limitée à 15 va-et-vient de la barre dans chacune des directions. Le début de l'arasage a été effectué par le milieu du moule afin de dégager le surplus de béton vers l'extérieur. Une même personne, le candidat à la maîtrise, a réalisé toutes les finitions des différentes phases du projet.

#### **4.5.3 MÛRISSEMENT**

Les échantillons ont été démoulés 24 ± 4h après la coulée. La méthode de mûrissement décrite à l'annexe B de la norme BNQ 2621-905 a été appliquée lors de toutes les phases du projet. Les échantillons ont été placés par la suite dans une chambre humide pour une durée de 13 jours. Ensuite, ils ont été mis à sécher à l'air ambiant durant 14 jours comme précisé dans la partie 3.3.3. Enfin, une pré-saturation a été appliquée sur la surface des plaques d'écaillage pour une durée de sept jours, à l'aide d'une solution de 3 % de NaCl.

Les cylindres utilisés pour les essais de résistance à la compression ont subi une cure de mûrissement suivant la norme CSA A23.2-3C jusqu'à la réalisation des essais. Les cylindres prélevés pour les essais de réseau d'air sont restés un minimum de 14 jours en chambre humide afin de garantir une bonne hydratation du béton et ainsi favoriser une bonne qualité du polissage de surface.

#### **4.5.4 FORMULATIONS**

##### **4.5.4.1 Phase 1 : bétons de type V-S avec granulats 5-20 mm**

Le programme de la phase 1 comporte sept bétons fabriqués avec les granulats provenant des sources 1, 2, 3, 8, 11, 12 et 14 (Tableau 4-24). Ces sept bétons ont un rapport E/L fixe de 0,40 et ont été produits avec un dosage en liant GUb-S/SF de 385 kg/m<sup>3</sup>. Les dosages en SP ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 100 et 165 mm. Le

dosage de l'AEA a également été ajusté pour finalement obtenir des teneurs en air comprises entre 5,5 et 8,2 %.

Le tableau 4.24 montre que les sept bétons produits lors de la phase 1 correspondent à des bétons de type V-S.

TABLEAU 4.24 - Formulations des bétons de la phase 1

	Unités	P-1	P-2	P-3	P-8	P-11	P-12	P-14
<b>Dosage des constituants</b>								
Liant	$[kg/m^3]$	373	390	366	368	388	380	380
Eau	$[kg/m^3]$	146	153	144	144	152	149	149
Sable	$[kg/m^3]$	739	772	726	729	769	754	752
Granulats 14 mm	$[kg/m^3]$	0	0	513	0	0	0	0
Granulats 20 mm	$[kg/m^3]$	906	932	329	889	949	965	977
Superplastifiant	$[ml/100kg \text{ de liant}]$	1052	1043	1107	1043	1045	1047	1043
Agent entraîneur d'air	$[ml/100kg \text{ de liant}]$	213	213	279	213	213	225	213
<b>Caractéristiques des bétons frais</b>								
Rapport E/L		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	$[\%]$	6,1	8	5,6	5,5	8,2	7,2	7,7
Affaissement	$[mm]$	100	160	110	100	165	125	150
Masse volumique	$[kg/m^3]$	2305	2193	2348	2334	2224	2304	2323
<b>Résistance à la compression</b>								
7 jours	$[MPa]$	31,8	27,2	37,1	33,4	28,2	30,5	29,4
28 jours	$[MPa]$	43,1	36,0	46,5	44,6	37,5	40,3	39,0

#### 4.5.4.2 Phase 2 : béton de type V-S avec granulats 5-14 mm

Le programme de la phase 2 comporte quatre bétons fabriqués avec les granulats provenant des sources 1, 3, 8 et 11 (Tableau 4-25). Ces quatre bétons ont un rapport E/L fixe de 0,40 et ont été produits avec un dosage en liant ternaire GUb-S/SF de 385 kg/m<sup>3</sup>. Les dosages en SP ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 100 et 195 mm. Le dosage de l'AEA a également été ajusté pour finalement obtenir des teneurs en air comprises entre 5,1 et 9 %.

Le tableau 4.25 montre que les quatre bétons produits lors de la phase 2 correspondent à des bétons de type V-S.

TABLEAU 4.25 - Formulations des bétons de la phase 2

	Unités	P-1	P-3	P-8	P-11
<b>Dosage des constituants</b>					
Liant	$[kg/m^3]$	378	390	369	393
Eau	$[kg/m^3]$	152	159	148	158
Sable	$[kg/m^3]$	744	771	727	775
Granulats	$[kg/m^3]$	915	946	890	960
Superplastifiant	$[ml/100kg \text{ de liant}]$	1395	1044	1113	1049
Agent entraîneur d'air	$[ml/100kg \text{ de liant}]$	254	212	302	302
<b>Caractéristiques des bétons frais</b>					
Rapport E/L		0,4	0,4	0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	$[\%]$	6,8	5,1	5,4	9
Affaissement	$[mm]$	195	110	100	155
Masse volumique	$[kg/m^3]$	2276	2204	2328	2193
<b>Résistance à la compression</b>					
7 jours	$[MPa]$	36,3	39,1	35,8	27,0
28 jours	$[MPa]$	46,3	51,3	46,0	35,8

#### 4.5.4.3 Phase 3 : béton de type XIII avec granulats 5-14 mm

Le programme de la phase 3 comporte deux bétons fabriqués avec les granulats provenant des sources 1 et 8 (Tableau 4-26). Ces deux bétons ont un rapport E/L fixe de 0,36 et ont été produits avec un dosage en liant ternaire GUb-S/SF de  $430 \text{ kg/m}^3$ . Les dosages en SP ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 175 et 177 mm. Le dosage de l'AEA a également été ajusté pour finalement obtenir des teneurs en air comprises entre 5,0 et 6,2 %.

Le tableau 4.26 montre que les deux bétons produits lors de la phase 3 correspondent à des bétons de type XIII.

TABLEAU 4.26 - Formulations des bétons de la phase 3

	Unités	P-1	P-8
<b>Dosage des constituants</b>			
Liant	$[kg/m^3]$	422	413
Eau	$[kg/m^3]$	154	134
Sable	$[kg/m^3]$	768	769
Granulats	$[kg/m^3]$	889	868
Superplastifiant	$[ml/100kg \text{ de liant}]$	1416	1740
Agent entraîneur d'air	$[ml/100kg \text{ de liant}]$	314	366
<b>Caractéristiques des bétons frais</b>			
Rapport E/L		0,36	0,36
Volume d'air (état frais)	$[\%]$	6,2	5,0
Affaissement	$[mm]$	175	177
Masse volumique	$[kg/m^3]$	2320	2364
<b>Résistance à la compression</b>			
7 jours	$[MPa]$	37,5	45,6
28 jours	$[MPa]$	50,4	59,3

#### 4.5.4.4 Phase 4 : béton de classe F2 avec granulats 5-20 mm

Le programme de la phase 4 comporte deux bétons fabriqués avec les granulats provenant des sources 1 et 8 (Tableau 4-27). Ces deux bétons ont un rapport E/L fixe de 0,55 et ont été produits avec un dosage en liant GU de  $300 \text{ kg/m}^3$ . Les dosages en réducteur d'eau ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 53 et 145 mm. Le dosage de l'AEA a également été ajusté pour finalement obtenir des teneurs en air comprises entre 5,3 et 6,4 %.

Le tableau 4.27 ci-après montre que les deux bétons produits lors de la phase 4 correspondent à des bétons de type F2. Il est à noter que le type du béton produit pour cette phase (F2) n'est notamment pas utilisé dans le cas d'une exposition aux cycles de gel-dégel et aux chlorures.

TABLEAU 4.27 - Formulations des bétons de la phase 4

	Unités	P-1	P-8
<b>Dosage des constituants</b>			
Liant	[kg/m <sup>3</sup> ]	298	294
Eau	[kg/m <sup>3</sup> ]	170	159
Sable	[kg/m <sup>3</sup> ]	844	843
Granulats	[kg/m <sup>3</sup> ]	937	900
Réducteur d'eau	[ml/100kg de liant]	176	174
Agent entraîneur d'air	[ml/100kg de liant]	51	51
<b>Caractéristiques des bétons frais</b>			
Rapport E/L		0,55	0,55
Volume d'air (état frais)	[%]	5,3	6,4
Affaissement	[mm]	53	145
Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]	2286	2281
<b>Résistance à la compression</b>			
7 jours	[MPa]	21,6	19,9
28 jours	[MPa]	27,5	24,9

#### 4.5.4.5 Phase 5 : Influence du facteur d'espacement (Béton V-S)

Le programme de la phase 5 comporte deux bétons fabriqués avec le granulat provenant de la source 11 (Tableau 4-28). Ces bétons ont un rapport E/L fixe de 0,55 et ont été produits avec un dosage en liant ternaire GUb-S/SF de 385 kg/m<sup>3</sup>. Les dosages en SP ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 120 et 135 mm. Le dosage de l'AEA a également été ajusté pour finalement obtenir des teneurs en air comprises entre 3,5 et 4,8 %.

Les bétons produits pour la phase 5 montrent un facteur d'espacement compris entre 173 et 224 µm. La surface spécifique des bulles d'air de ces bétons est, elle, comprise entre 26,9 et 27,9 mm<sup>-1</sup>. Les réseaux de bulles d'air sont de bonnes qualités : les facteurs d'espacement sont inférieurs de 230 µm et la surface spécifique des bulles est supérieure à 25 mm<sup>-1</sup>.

Le tableau 4.28 ci-après montre que les deux bétons produits lors de la phase 5 correspondent à des bétons de type V-S protégés par un réseau de bulles d'air de bonne qualité.

TABLEAU 4.28 - Formulations des bétons de la phase 5

	Unités	P-11 224 $\mu\text{m}$	P-11 173 $\mu\text{m}$
<b>Dosage des constituants</b>			
Liant	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	362	369
Eau	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	146	149
Sable	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	713	728
Granulats	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	885	903
Superplastifiant	$[\text{ml}/100\text{kg de liant}]$	1038	1041
Agent entraîneur d'air	$[\text{ml}/100\text{kg de liant}]$	79	140
<b>Caractéristiques des bétons frais</b>			
Rapport E/L		0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	$[\%]$	3,5	4,8
Affaissement	$[\text{mm}]$	120	135
Masse volumique	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	2386	2338
<b>Caractéristiques des bétons durcis</b>			
$\bar{L}$	$[\mu\text{m}]$	224	173
$\alpha$	$[1/\text{mm}]$	26,9	27,9
Volume d'air (état durci)	$[\%]$	3,3	5,0
<b>Résistance à la compression</b>			
7 jours	$[\text{MPa}]$	37,6	35,4
28 jours	$[\text{MPa}]$	38,3	36,5

#### 4.5.4.6 Phase 6 : influence du géotextile (bétons de classe C2)

Le programme de la phase 6 comporte deux bétons fabriqués avec le granulat provenant de la source de l'Université de Sherbrooke (Tableau 4-29). Ces deux bétons ont un rapport E/L fixe de 0,42 et ont été produits avec un dosage en liant GU de  $400 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Les dosages en SP ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 54 et 90 mm. Le dosage de l'AEA a également été ajusté pour finalement obtenir des teneurs en air comprises entre 3,9 et 6,6 %.

Les bétons produits pour la phase 6 montrent des facteurs espacements compris entre 156 et  $191 \mu\text{m}$ . La surface spécifique des bulles d'air de ces bétons est, elle, comprise entre  $29,8$  et  $32,2 \text{ mm}^{-1}$ . Les réseaux de bulles d'air sont de bonne qualité : les facteurs d'espacement sont inférieurs à  $230 \mu\text{m}$  et la surface spécifique des bulles est supérieure à  $25 \text{ mm}^{-1}$ .

Le tableau 4.29 ci-après montre que les deux bétons produits lors de la phase 6 correspondent à des bétons de type C2.

TABLEAU 4.29 - Formulations des bétons de la phase 6

Formulations	Unités	C2-156 $\mu\text{m}$	C2-191 $\mu\text{m}$
<b>Dosage des constituants</b>			
Liant	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	404	399
Eau	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	167	158
Sable	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	779	755
Granulats 14 mm	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	208	201
Granulats 20 mm	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	792	765
Réducteur d'eau	$[\text{ml}/100\text{kg de liant}]$	553	130
Agent entraîneur d'air	$[\text{ml}/100\text{kg de liant}]$	243	50
<b>Caractéristiques des bétons frais</b>			
Rapport E/L		0,42	0,42
Volume d'air (état frais)	$[\%]$	6,6	3,9
Affaissement	$[\text{mm}]$	90	54
Masse volumique	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	2307	2389
<b>Caractéristiques des bétons durcis</b>			
$\bar{L}$	$[\mu\text{m}]$	156	191
$\alpha$	$[1/\text{mm}]$	29,8	32,2
Volume d'air (état durci)	$[\%]$	6,0	3,1
<b>Résistance à la compression</b>			
7 jours	$[\text{MPa}]$	29,0	33,8
28 jours	$[\text{MPa}]$	36,7	40,9



# Chapitre 5 : RÉSULTATS

## 5.1 CARACTÉRISATION DES SOURCES GRANULAIRES

Les résultats des essais de caractérisation des granulats provenant des 17 sources granulaires sont présentées au tableau 5.1. Ces essais ont été réalisés par trois différents laboratoires numérotés 1, 2 et 3 comme précédemment.

Globalement, les résultats du tableau 5.1 montrent que le choix de ces 17 sources granulaires couvre une grande plage de performance du point de vue des pertes aux essais de gel-dégel non confiné et Micro Deval. Par exemple, pour l'essai de gel-dégel non confiné, les valeurs sont comprises entre 0 et 12 %. Pour l'essai Micro Deval, les valeurs sont comprises entre 2 et 21 %.

Dans le cas de l'essai de gel-dégel non confiné, le laboratoire 2 obtient des valeurs qui sont systématiquement inférieures à celles obtenues par les laboratoires 1 et 3. Les valeurs obtenues par les laboratoires 1 et 3 sont très voisines.

Une analyse des valeurs du tableau 5.1 fait ressortir quelques points saillants :

- Le granulat de la source 7 montre les pertes massiques les plus faibles tant pour le gel-dégel non confiné que pour le Micro Deval (0,8 % et 2,5 % respectivement) ;
- Le granulat de la source 3 possède la plus forte perte à l'essai Micro Deval (20,2 %) mais une des plus faibles pertes au gel-dégel non confiné (2,2 %) ;
- Le granulat de la source 11 possède la plus forte perte à l'essai de gel-dégel non confiné (10,2 %) ;
- Le granulat de la source 8 possède les pertes totales combinées les plus élevées pour les essais de gel-dégel non confiné et Micro Deval ( $7,1 \% + 19,7 \% = 26,8 \%$ ).

C'est sur la base des résultats du tableau 5.1 qu'ont été choisies les sept sources granulaires ayant fait l'objet de l'analyse détaillée de la durabilité à l'écaillage. Comme expliqué au chapitre 3, trois catégories de performance ont été définies : supérieure, intermédiaire et inférieure.

La catégorie supérieure (numéro 1) regroupe les sources granulaires 2 et 12 :

- Le granulat de la source 2 est une pierre de type granitique. La perte moyenne au Micro Deval est de 12,4 %, ce qui est très inférieur à la limite maximale de 17 % de la norme CSA. La perte moyenne au gel-dégel non confiné est de 3,6 %, ce qui est inférieur à la limite maximale de 6 % de la norme CSA ;
- Le granulat de la source 12 est une pierre de type dolomie. Les pertes moyennes aux essais Micro Deval et gel-dégel non confiné sont respectivement de 6,4 % et 3,0 %, ce qui est nettement inférieur aux limites maximales de la norme CSA de 19 % et 9 % respectivement.

Globalement, cette catégorie regroupe deux pierres de qualité supérieure qui comporte une source d'origine magmatique (plutonique) et une source d'origine sédimentaire. Les nombres pétrographiques sont de 124 (source 2) et de 112 (source 12), ce qui correspond à une « bonne » qualité physico-mécanique pour la production du béton.

La catégorie intermédiaire (numéro 2) regroupe les sources granulaires 3, 11 et 14 :

- Le granulat de la source 3 est un calcaire qui possède une perte au gel-dégel non confiné très faible (2,2 %) mais une perte moyenne au Micro Deval parmi les plus élevées (20,3 %, au-delà des exigences fixées par la norme CSA). Cette pierre a été choisie en raison de cette particularité unique ;
- Le granulat de la source 11 est un calcaire qui montre la perte moyenne au gel-dégel non confiné la plus élevée (10,2 %, au-delà des exigences fixées par la norme CSA) mais une perte moyenne au Micro Deval de niveau

intermédiaire (14,9 %). Cette pierre a été choisie en fonction de cette particularité spécifique ;

- Le granulats de la source 14 est une roche volcanique correspondant à un basalte. Les pertes moyennes au gel-dégel non confiné et au Micro Deval se situent au niveau intermédiaire par rapport à l'ensemble des 17 sources de cette étude (6,4 %, au-delà des exigences fixées par la norme CSA, et 8,8 % respectivement).

Globalement, cette catégorie regroupe trois pierres de qualité intermédiaire, soit deux pierres calcaires et un basalte. Elle reflète donc une diversité minéralogique. Sur la base des nombres pétrographiques, cette catégorie regroupe deux sources de qualité jugée « bonne » (pierre 3 : NP = 122 et pierre 14 : NP = 103) et une source de qualité jugée « passable » (pierre 11 : NP = 137).

La catégorie inférieure (numéro 3) regroupe les sources granulaires 1 et 8 :

- Le granulats de la source 1 est un calcaire dont les pertes moyennes au gel-dégel non confiné (7,4 %) et au Micro Deval (18,6 %) sont relativement proches des valeurs limites maximales de 9 et 19 % respectivement ;
- Le granulats de la source 8 est un calcaire dont les pertes moyennes au gel-dégel non confiné (10,3 %) et au Micro Deval (19,7 %) sont parmi les plus élevées de cette étude. La perte Micro Deval et la perte au gel-dégel sont supérieures aux valeurs maximales de la norme CSA.

Globalement, cette catégorie regroupe deux pierres calcaires de qualité inférieure. Les NP (source 1 : 145 et source 8 : 152) sont jugés de qualité physico-mécanique « médiocre » pour la production de béton.

**TABEAU 5.1 – Caractérisation complète selon le tableau 12 de la norme CSA A23.1 des sources granulaires étudiées**

Source			#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17
Essai	Norme	Laboratoire																	
<b>Gel-dégel non confiné (%)</b>	CSA A23.2-24A	Laboratoire 1	7,8	3,6	2,7	5,3	6,9	6,5	0,8	10,5	2,5	2,5	11,4	3,2	6,6	7,4	3,5	8,8	1,3
		Laboratoire 2	5,3	2,8	1,2	4	4,6	4,3	0,3	4,5*	0,9	0,7	7,4	2,5	3,1	4,9	2,9	5,2	0,6
		Laboratoire 3	9	4,3	2,8	8,4	2,9	7,7	1,3	10,1	2,6	1,8	11,9	6,2	3,9	6,9	2,3	5,7	1,5
		Moyenne	7,4	3,6	2,2	5,9	4,8	6,2	0,8	10,3	2,0	1,7	10,2	4,0	4,5	6,4	2,9	6,6	1,1
<b>Micro Deval (%)</b>	CSA A23.2-29A	Laboratoire 1	20,8	12,9	20,9	9,7	9,4	18,1	2,6	20,2	19	19,4	14,8	6,4	16,3	8,5	16,1	19,1	5,9
		Laboratoire 2	17,7	13,1	20,1	9,8	8,7	18,2	2,8	19,4	18,8	17,9	15,2	6,7	14,6	9,2	13,5	19,4	5,2
		Laboratoire 3	17,4	11,2	19,5	8,6	8,2	17,6	2,2	19,4	15,2	18,1	14,8	3,1	15,2	8,7	15,3	19,4	4,8
		Moyenne	18,6	12,4	20,2	9,4	8,8	18,0	2,5	19,7	17,7	18,5	14,9	5,4	15,4	8,8	15,0	19,3	5,3
<b>MgSO<sub>4</sub></b>	CSA A23.2-9A	Laboratoire 1	5,1	2,7	2	1,6	1,1	2,2	0,3	4,7	0,5	0,7	2,7	0,1	5,7	6	1	7,4	0,5
		Laboratoire 2	5,18	7,86	1,75	2,28	1,16	4,01	0,5	6,45	0,61	0,59	2,46	0,52	4,14	4,86	0,71	3,08	0,9
		Moyenne	5,14	5,28	1,875	1,94	1,1	3,105	0,4	5,575	0,555	0,645	2,58	0,31	4,92	5,43	0,855	5,24	0,7
<b>Los Angeles</b>	CSA A23.2-16A	Laboratoire 3	21,6	39,7	36,3	12	19,9	26,9	12,2	22,8	24,8	31,7	23,1	17,8	23,1	18,3	18,6	28,8	22,5
<b>Part. fines passant 80µm (g)</b>	CSA A23.2-5A	Laboratoire 3	1,6	1,8	2	1,4	2,3	3,1	0,7	2,1	1,3	1,7	1,3	1,6	2,5	0,9	1,9	1,4	1,5
<b>Part. légères</b>	CSA A23.2-4A	Laboratoire 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Mottes d'argile et part. friable</b>	CSA A23.2-3A	Laboratoire 3	0,7	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,1	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4	0,5	0,3
<b>Part. plates</b>	CSA A23.2-13A	Laboratoire 3	20,8	11,8	18	11,7	17,3	12,7	11,7	19,7	20,8	18	8,4	15,4	41,9	11,6	23,8	13,7	18,7
<b>Part. allongées</b>	CSA A23.2-13A	Laboratoire 3	51,8	40,1	32,1	30,5	25,6	31	28,2	36,5	38	45,3	22,4	32,9	62,6	35,6	43,3	34,3	32,3
<b>Part. plates et allongées</b>	CSA A23.2-13A	Laboratoire 3	11,5	3,8	4,8	2,9	3,9	2,4	2,6	4,3	6,9	4,6	1,3	4,5	3,1	3,8	10,4	2,3	6,2
<b>Nombre pétrographique</b>	CSA A23.2-15A	Laboratoire 3	145	124	122	101	105	129	100	152	139	121	137	112	118	103	111	118	105

\*Valeur non prise en compte dans les calculs de moyen

La figure 5.1 présente les plages de variation des pertes massiques Micro Deval et au gel-dégel non confiné pour l'ensemble des sources granulaires. Pour chacune d'entre elles, cette figure indique la moyenne, le minimum et le maximum obtenus par les trois laboratoires mandatés pour réaliser les essais en question. Le choix des sources couvre assez bien l'ensemble des combinaisons gel-dégel non confiné et Micro Deval. Les sources granulaires avec une perte au Micro Deval inférieure à 10 % ont une perte au gel-dégel inférieure à 7 %. À l'inverse les sources granulaires avec un Micro Deval supérieur à 10 % peuvent avoir une perte au gel-dégel non confiné très variable, comprise entre moins de 2 % et plus de 10 %.

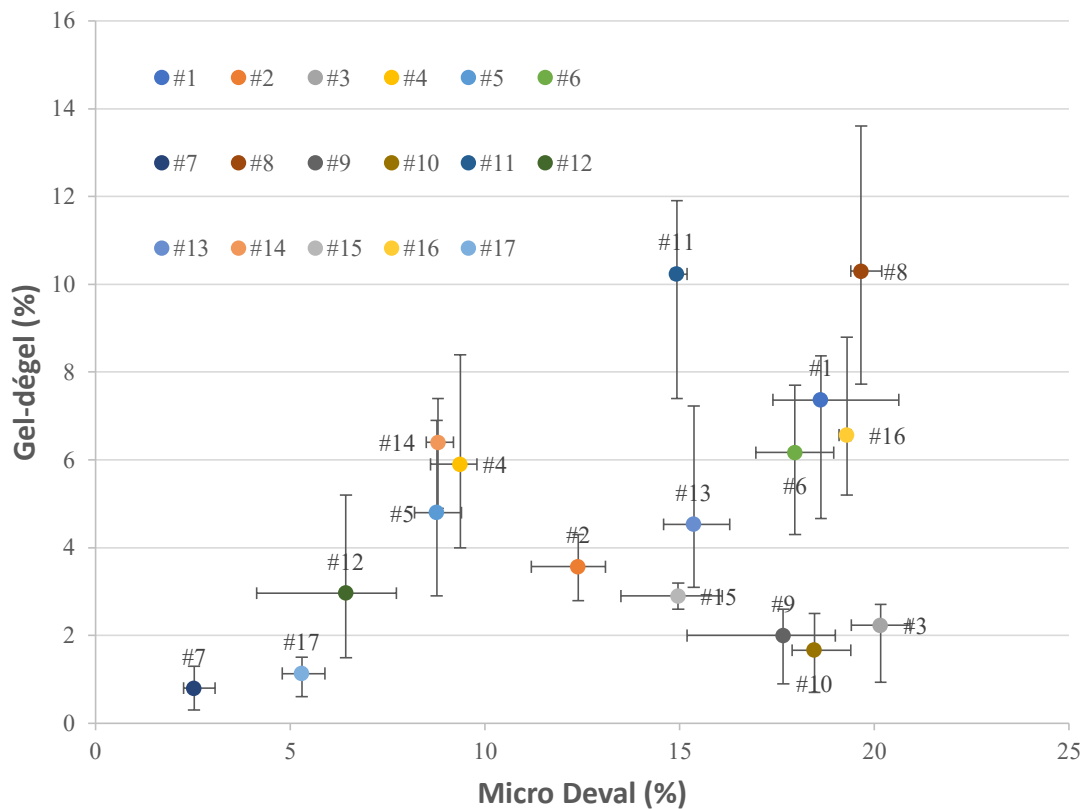


FIGURE 5.1 - Résumé des essais de gel-dégel et Micro Deval

Pour une source granulaire donnée, l'écart entre les valeurs maximale et minimale est plus important pour la perte au gel-dégel non confiné que pour la perte au Micro Deval. La réponse de l'essai au gel-dégel non confiné semble donc un peu moins précise. Tel que mentionné précédemment, le laboratoire 2 a systématiquement obtenu les valeurs les plus faibles de gel-dégel non confiné.

## 5.2 RELATION ENTRE CERTAINES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DU GRANULAT ET LA RESISTANCE A L'ECAILLAGE – PHASE 1

### 5.2.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La figure 5.2 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons de la phase 1. Les courbes indiquent que pour toutes les sources de granulat, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à la valeur minimale de 35 MPa pour les bétons de type V-S. Les résistances à la compression sont comprises entre 36,1 MPa pour le béton fabriqué avec le granulat de la source 2 et 46,5 MPa pour le béton fabriqué avec le granulat de la source 3. Ces variations peuvent être expliquées par la variation de la teneur en air à l'état frais des mélanges de béton, comme l'indique la figure 5.3.

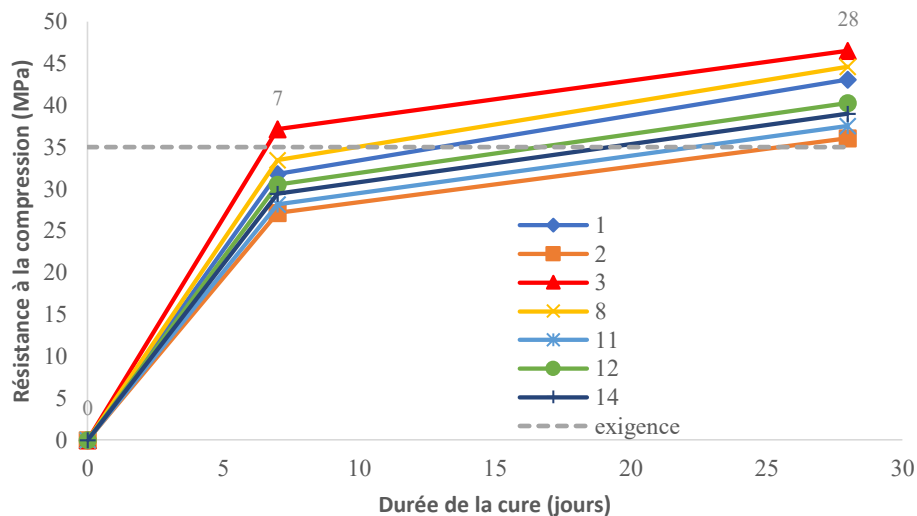


FIGURE 5.2 - Résistance à la compression des bétons de la phase 1

Les courbes de la figure 5.3 montrent qu'il existe une relation relativement précise entre le volume d'air à l'état frais et la résistance à la compression à 7 et 28 jours. Comme attendu, plus le volume d'air est élevé, plus la résistance à la compression est faible. Ces résultats confirment que les variations dans la résistance à la compression découlent essentiellement des variations du volume d'air.

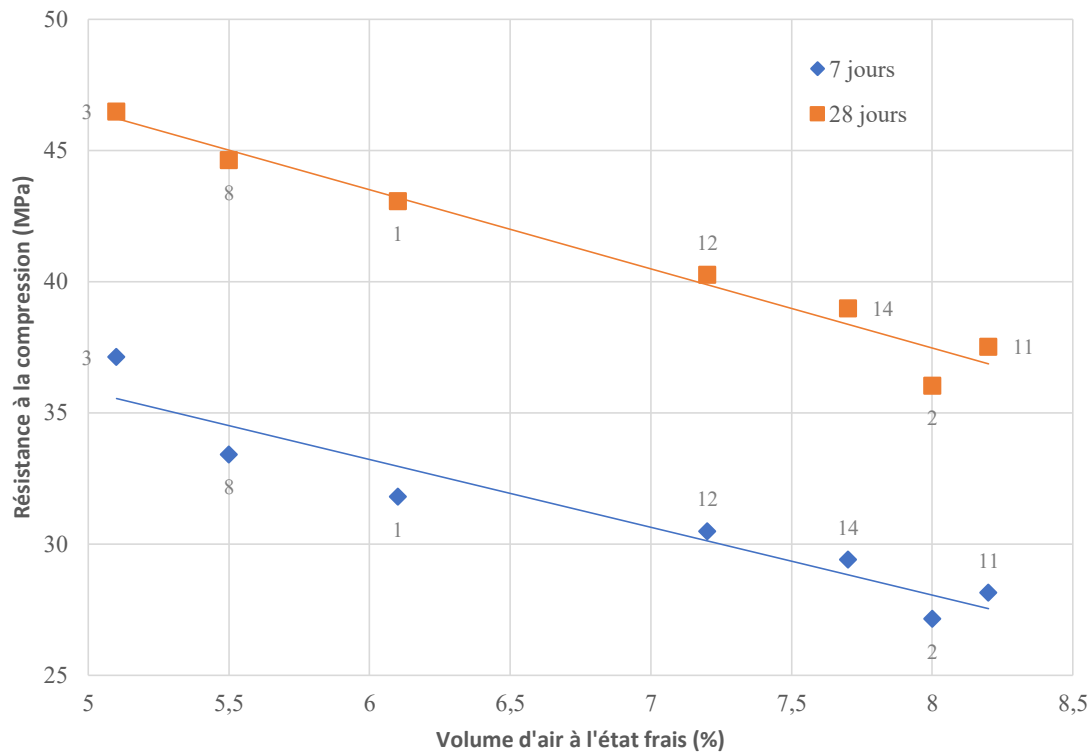


FIGURE 5.3 - Corrélation entre la variation des résistances à la compression et des teneurs en air des bétons de la phase 1

## 5.2.2 DURABILITE A L'ECAILLAGE

Le tableau 5.2 présente les masses de débris obtenues après 56 cycles de gel-dégel pour les sept bétons de la phase 1. Chaque béton a été utilisé pour produire trois paires de plaques (gauche, milieu et droite) pour vérifier l'homogénéité des conditions de gel-dégel dans la chambre froide. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques sont présentées en annexe 3. Des photos illustrant l'aspect visuel de la surface des plaques à la fin des cycles de gel-dégel peuvent y être également retrouvées.

Les résultats du tableau 5.2 montrent que seul le béton fabriqué avec le granulat de la source 3 respecte tout juste la limite maximale de  $500 \text{ g/m}^2$  après 56 cycles. Tous les autres bétons

de cette phase ont une masse de débris moyenne comprise entre 505 et 704 g/m<sup>2</sup>. Malgré la présence d'un bon réseau de bulles d'air, ces bétons n'ont pas une durabilité à l'écaillage conforme à l'exigence de la norme BNQ 2621-905 Annexe B. Il faut noter que la durabilité à l'écaillage de ces bétons n'est pas « catastrophique ». Le dosage des constituants n'est probablement pas la cause de cette durabilité à l'écaillage non conforme car la formulation de type V-S est réputée durable à l'écaillage. Il est possible que le liant ternaire GUb-S/SF utilisé puisse être à l'origine de cet écaillage plus important. Une analyse plus approfondie sera faite au chapitre suivant.

Il faut noter que les masses de débris obtenues avec la plaque du milieu et la source 14 ne sont pas valides car des fuites de la solution ont été observées lors des cycles de gel-dégel. Ces valeurs n'ont pas été incluses dans le calcul des moyennes.

L'histogramme de la figure 5.4 présente les masses de débris des sources granulaires en fonction de la localisation dans la chambre de gel-dégel. Les valeurs les plus élevées ont été obtenues avec les granulats des sources 1, 8 et 11. Ces trois granulats possèdent les plus fortes pertes au gel-dégel non confiné. Les sources 8 et 11 (plaques à droite) montrent un grand écart par rapport à la moyenne.

Globalement, il n'est pas possible de conclure d'un éventuel effet de la localisation dans la chambre sur la masse de débris. En effet, les masses de débris varient en fonction de la localisation mais ne pointent pas un défaut particulier. Il n'est donc pas possible de dégager une tendance nette sur l'effet de la localisation sur l'intensité de l'écaillage. Ces résultats suggèrent que la chambre de gel-dégel produit des cycles thermiques qui ne dépendent pas de la localisation des plaques dans l'enceinte climatique (homogénéité des cycles). Une analyse plus détaillée de ces résultats sera effectuée au chapitre suivant.



TABLEAU 5.2 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 1

Source de granulats	Catégorie de granulats	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [g/m <sup>2</sup> ]			
			Maxima	Minima	Moyenne emplacement	Moyenne béton
1	3	Gauche	674	603	639	647
		Milieu	688	541	615	
		Droite	752	626	689	
8	3	Gauche	611	603	607	704
		Milieu	692	576	634	
		Droite	915	826	871	
3	2	Gauche	406	397	402	435
		Milieu	548	455	502	
		Droite	461	345	403	
11	2	Gauche	617	601	609	664
		Milieu	657	572	615	
		Droite	878	661	770	
14	2	Gauche	514	502	508	505
		Milieu	291*	96*	194*	
		Droite	512	490	501	
2	1	Gauche	589	433	511	511
		Milieu	608	535	572	
		Droite	467	431	449	
12	1	Gauche	545	465	505	505
		Milieu	572	494	533	
		Droite	517	434	476	

\* mesures non valides en raison de la fuite de la solution

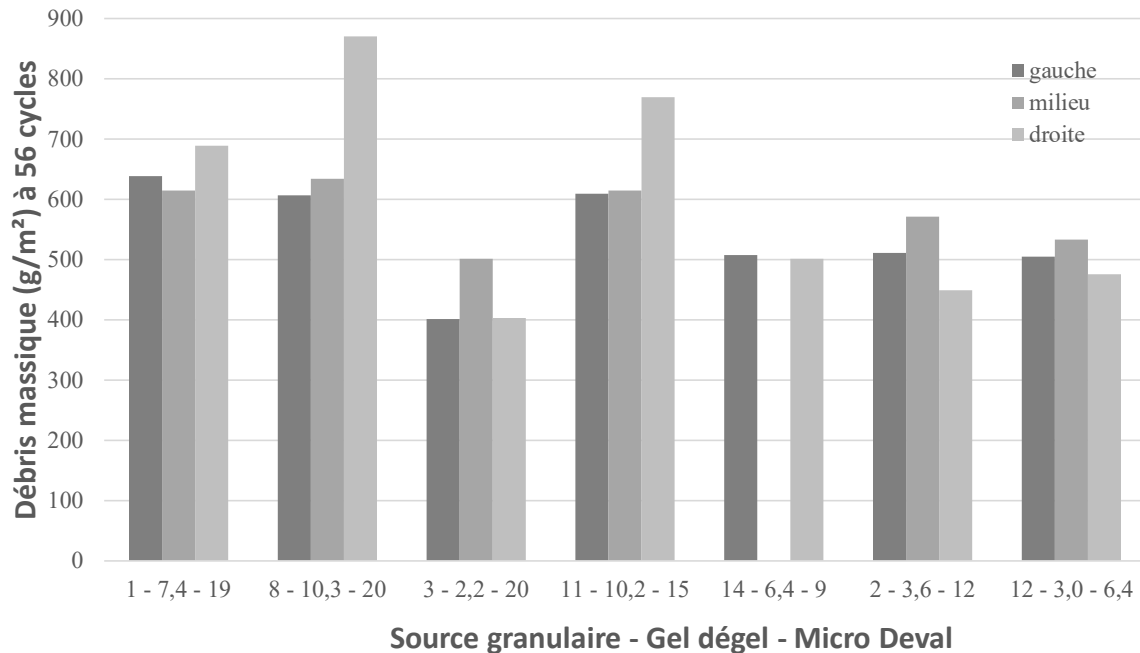


FIGURE 5.4 - Résultats moyens des débris massiques à 56 cycles en fonction de la source granulaire et de l'emplacement dans la chambre froide

### 5.2.3 *DEGARNISSEMENT ET ECLATEMENT DES GRANULATS*

Les figures 5.5 et 5.6 présentent les résultats des mesures de surface d'éclatement et de dégarnissement des bétons de la phase 1 après 56 cycles de gel-dégel. Les surfaces d'éclatement et de dégarnissement sont exprimées en pourcentage de la surface totale exposée. Chaque résultat est la moyenne des six plaques d'écaillage produites pour chaque source granulaire. Les barres verticales indiquent les valeurs minimales et maximales obtenues à partir de ces six plaques. Les courbes détaillées de l'évolution des dégarnissements et éclatements sont regroupées à l'annexe 4.

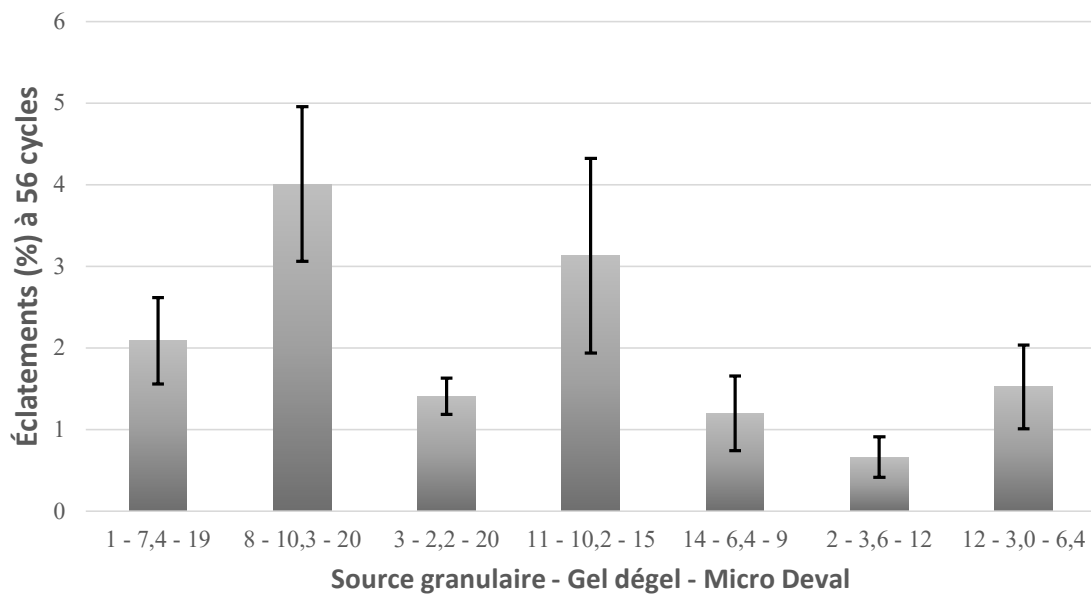


FIGURE 5.5 - Pourcentage de surface éclatée des bétons de la phase 1

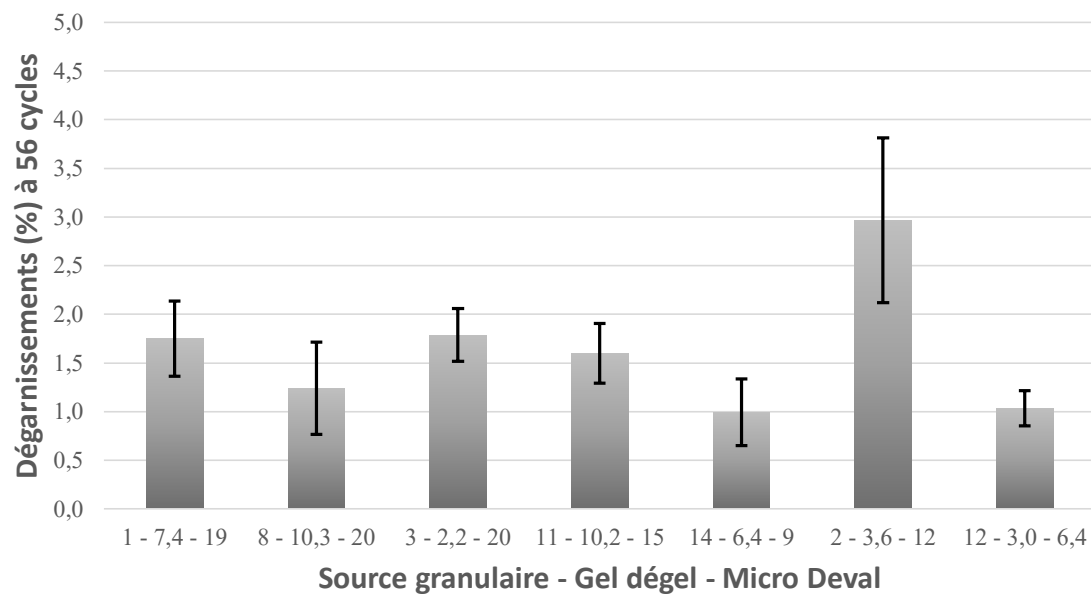


FIGURE 5.6 - Pourcentage de surface dégarnie des bétons de la phase 1

Les résultats de la figure 5.5 montrent que la surface moyenne d'éclatements des granulats est comprise entre 0,7 % (source 2) et 4 % (source 8). Les plaques associées aux sources 1, 8 et 11 présentent les surfaces éclatées les plus élevées. Ce sont aussi les sources qui

possèdent les plus fortes pertes au gel-dégel (supérieures à 7,1 %). L'analyse détaillée de ces résultats sera effectuée au chapitre suivant.

Les résultats de la figure 5.6 montrent que la surface moyenne dégarnie des plaques associées aux différentes sources granulaires testées est comprise entre 1,0 et 3 %. À l'exception de la source 2, les valeurs les plus élevées de dégarnissement (supérieure à 1,0 %) sont obtenues pour les granulats ayant une perte Micro Deval supérieure à 15 %. La source 2 semble être un cas particulier qui sera discuté plus en détail au chapitre 6.

Les courbes des figures 5.7 à 5.9 présentent l'évolution typique des surfaces éclatées et dégarnies tout au long des cycles de gel-dégel des essais d'écaillage (sources 12, 3 et 8). En général, la progression est régulière tout au long de l'essai. Pour les sources 12 et 3 (figures 5.7 et 5.8), l'évolution des dégarnissements et des éclatements se produit approximativement selon la même cinétique. Ce comportement est typique des autres sources. Cependant, des cinétiques différentes peuvent survenir (les courbes détaillées sont présentes à l'annexe 4). C'est notamment le cas de la source 8 (figure 5.9). Durant les 35 premiers cycles, les dégarnissements et les éclatements progressent de la même manière. À partir de 35 cycles, les dégarnissements commencent à diminuer alors que les éclatements progressent plus rapidement. Ce phénomène découle du fait que des dégarnissements se transforment en éclatements. Des particules dégarnies sont probablement plus fortement exposées aux sels de déglacage et à la saturation. Elles sont donc plus susceptibles d'être dégradées par le processus d'éclatement.

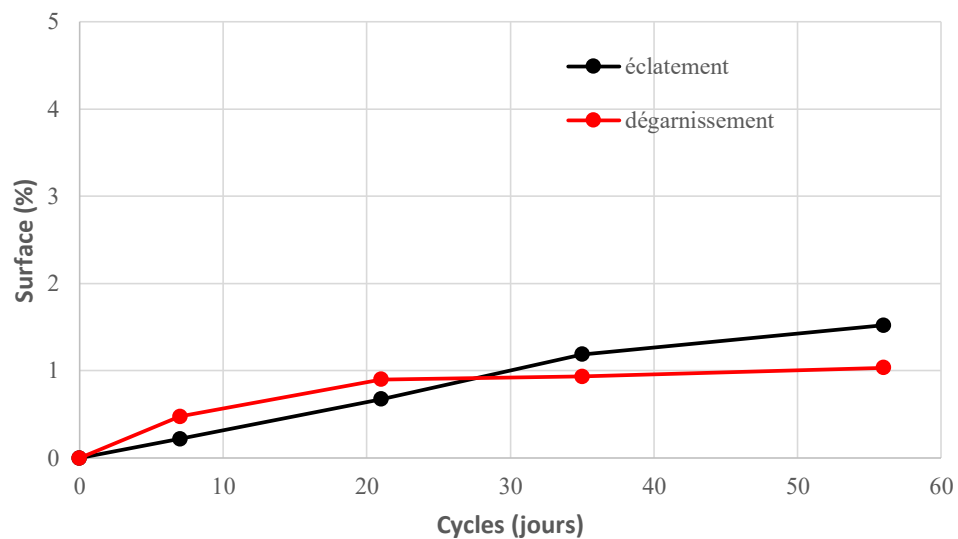


FIGURE 5.7 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulats de la source 12 (catégorie 1)

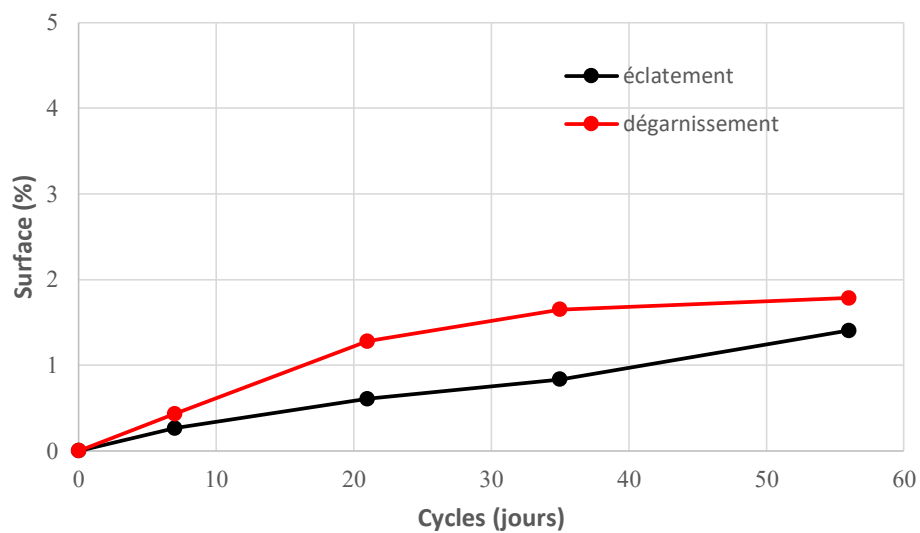


FIGURE 5.8 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulats de la source 3 (catégorie 2)

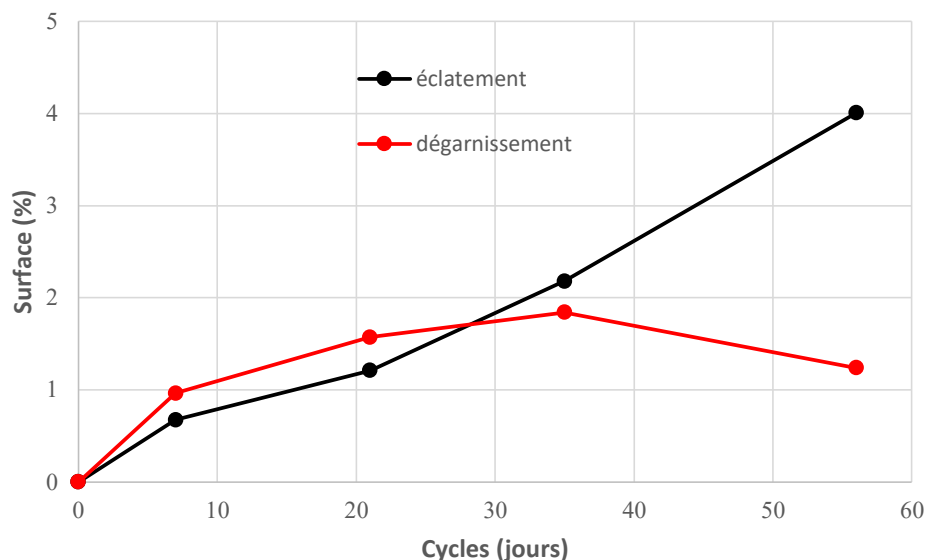


FIGURE 5.9 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulat de la source 8 (catégorie 3)

### 5.3 INFLUENCE DE LA DIMENSION MAXIMALE DU GROS GRANULAT SUR LA SUSCEPTIBILITE A L'ECLATEMENT / DEGARNISSEMENT – PHASE 2

#### 5.3.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La figure 5.10 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 2 en fonction du temps. Les courbes indiquent que pour toutes les sources de granulat, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à l'exigence minimale de 35 MPa exigé. Cependant, il faut noter un écart entre les résistances obtenues : le béton incorporant le granulat de la source 3 possède la résistance la plus élevée (51,3 MPa) tandis que le béton associé à la source 11 montre la plus faible résistance (35,8 MPa). Ces variations peuvent être expliquées par la variation de la teneur en air à l'état frais, comme l'indique la figure 5.11. Ces variations sont similaires à celles de la phase 1.

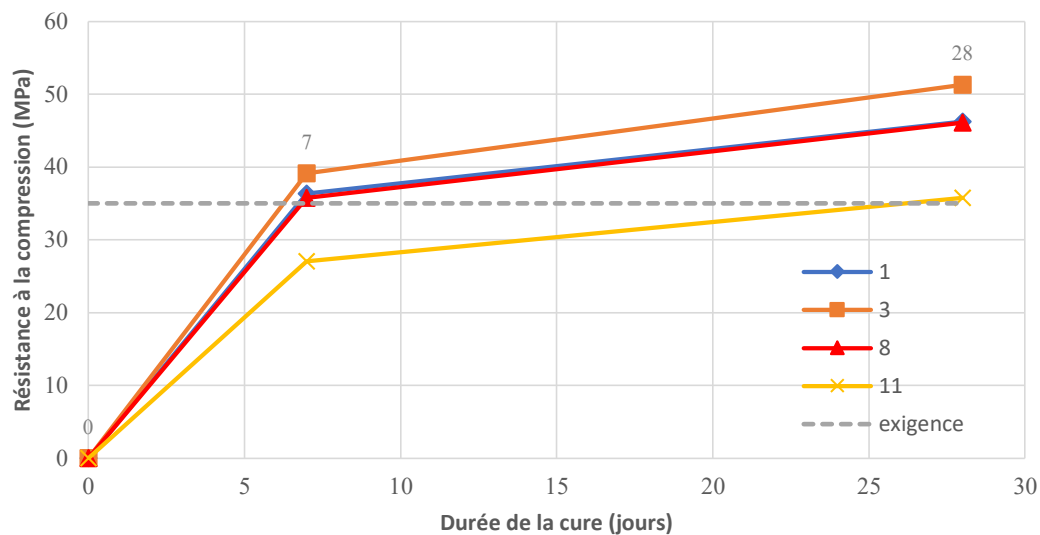


FIGURE 5.10 - Résistance à la compression des bétons de la phase 2

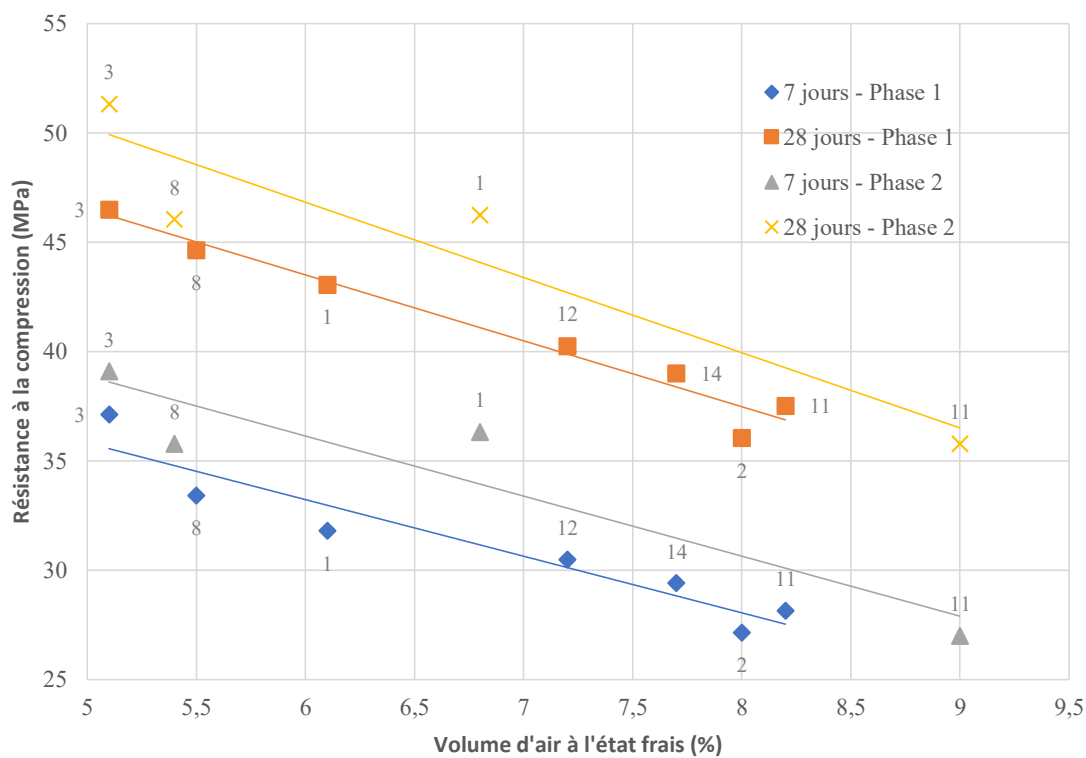


FIGURE 5.11 - Corrélation entre la variation des valeurs de résistance à la compression et des teneurs en air des bétons de la phase 2

### 5.3.2 DURABILITE A L'ECAILLAGE

Le tableau 5.3 présente les masses de débris obtenues après 56 cycles de gel-dégel pour les quatre bétons de la phase 2 qui sont fabriqués avec un gros granulat de calibre 5 – 14 mm.

Chaque béton a été utilisé pour produire une paire de plaques placées à gauche de la chambre froide. Ce tableau présente les masses de débris en  $\text{g/m}^2$ . Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques sont présentées en annexe 5. L'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude y est également illustré.

Comme dans le cas des bétons de la phase 1, la plupart des bétons de la phase 2 montrent une masse des débris supérieure à  $500 \text{ g/m}^2$ . Seul le béton fabriqué avec le granulat de la source 1 ( $375 \text{ g/m}^2$ ) satisfait l'exigence maximale de  $500 \text{ g/m}^2$ . Les bétons de la phase 2 sont fabriqués avec le même liant ternaire GUb-S/SF utilisé pour la phase 1.

TABLEAU 5.3 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 2

Source de granulat	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [ $\text{g/m}^2$ ]		
		Maxima	Minima	Moyenne
<b>1</b>	Gauche	413	381	397
<b>3</b>	Gauche	562	545	554
<b>8</b>	Gauche	725	649	687
<b>11</b>	Gauche	623	506	565

### 5.3.3 *DEGARNISSEMENT ET ECLATEMENT DES GRANULATS*

Les figures 5.12 et 5.13 présentent les pourcentages moyens des surfaces d'éclatement et de dégarnissement après 56 cycles. Les plaques correspondant aux sources 1 et 8 (catégorie inférieure) présentent les plus grandes surfaces éclatées (supérieure à 2,8 %). Les plaques correspondant à la source 11 (catégorie intermédiaire) montre aussi une surface d'éclatement élevée (2,9 %). Ces trois résultats élevés ont été obtenus avec des sources granulaires caractérisée par une perte à l'essai de gel-dégel non confiné supérieure à 7 %. Une première analyse de ces résultats indique que l'utilisation d'un gros granulat de calibre 5 – 14 mm produit des surfaces d'éclatement très similaires à celles des bétons de la phase 1 produits avec des gros granulats de calibre 5 – 20 mm.

La figure 5.13 présente les surfaces moyennes de dégarnissement après 56 cycles de gel-dégel. À l'exception de la source 3, les surfaces dégarnies sont relativement faibles (inférieure à 1,0 %). En comparant ces résultats à ceux présentés à la figure 5.6 (phase 1), il semble qu'une diminution de la taille du gros granulat pourrait contribuer à diminuer la



susceptibilité du granulat face au dégarnissement. Une analyse plus détaillée de ces résultats sera réalisée au chapitre suivant.

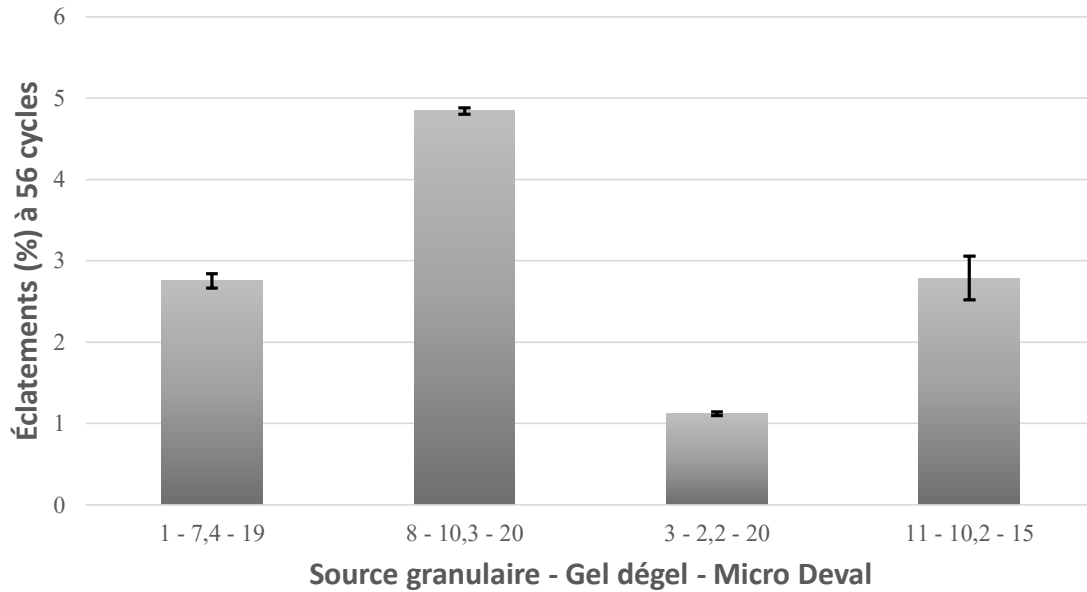


FIGURE 5.12 - Pourcentage de surface écaillée des bétons de la phase 2

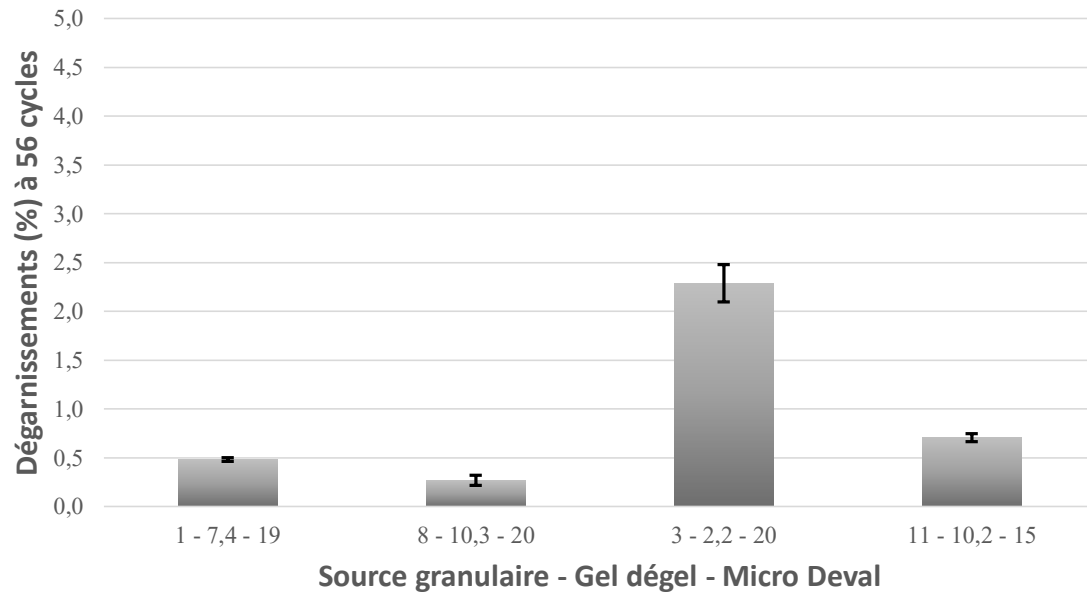


FIGURE 5.13 - Pourcentage de surface dégarnie des bétons de la phase 2

## 5.4 INFLUENCE D'UNE MATRICE DE BETON A HAUTE PERFORMANCE (XIII) SUR LA SUSCEPTIBILITE A L'ECLATEMENT / DEGARNISSEMENT – PHASE 3

### 5.4.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La figure 5.14 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 3 en fonction du temps. Les courbes indiquent que pour les deux sources de granulat, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à l'exigence minimale de 50 MPa. Cependant, il faut noter un écart entre les résistances mesurées : le béton incorporant le granulat de la source 8 a donné la résistance la plus élevée (59,3 MPa) tandis que le béton correspondant à la source 1 montre une résistance environ 18 % plus faible (50,4 MPa).

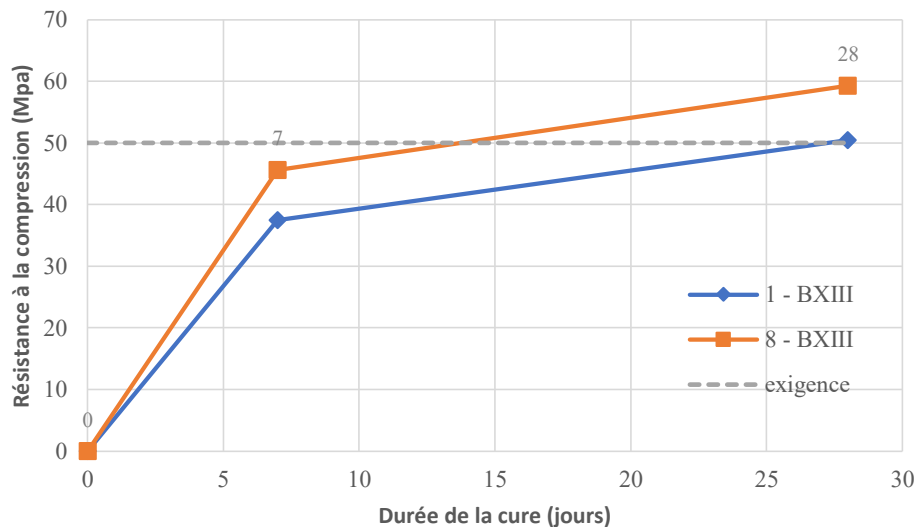


FIGURE 5.14 - Résistance à la compression des bétons de la phase 3

### 5.4.2 DURABILITÉ À L'ÉCAILLAGE

Le tableau 5.4 présente les masses de débris (en g/m<sup>2</sup>) des bétons de la phase 3 obtenues après 56 cycles de gel-dégel. Chaque béton a été utilisé pour produire une paire de plaques placées à gauche de la chambre froide. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques sont présentées en annexe 7. L'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude y est également illustré.

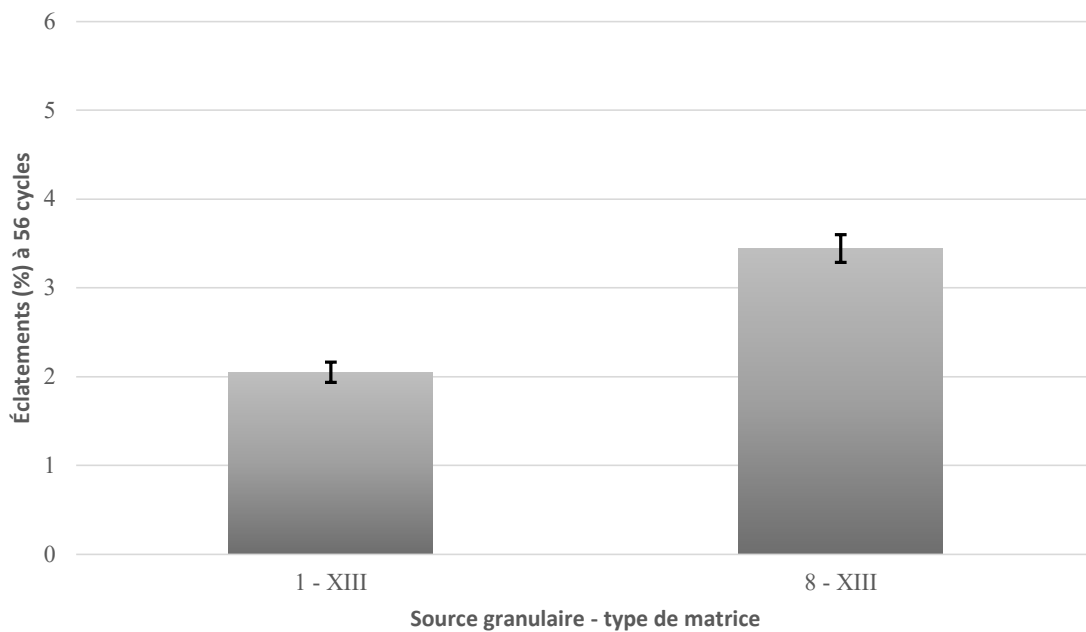
Les résultats du tableau 5.4 montrent que la masse de débris des bétons de type XIII produits avec les deux sources granulaires de la catégorie inférieure (1 et 8) respecte largement l'exigence maximale de 500 g/m<sup>2</sup>. Cette bonne durabilité à l'écaillage était prévisible car la matrice à haute performance de type XIII possède un potentiel de durabilité supérieur à celui de la matrice V-S utilisé pour les phases 1 et 2.

TABLEAU 5.4 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 3

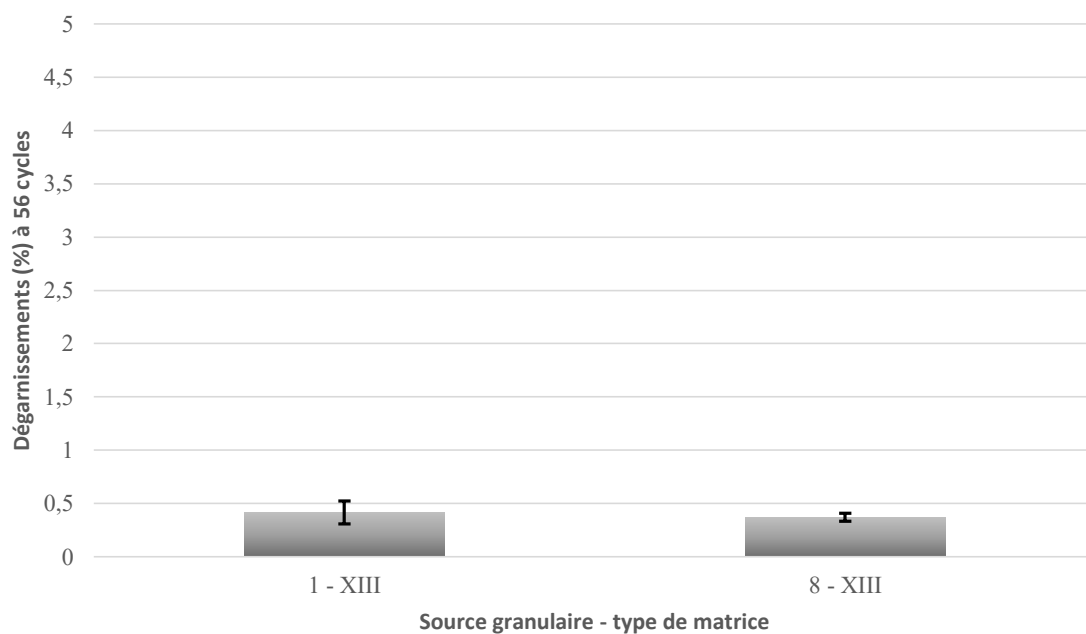
Source de granulat	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [g/m <sup>2</sup> ]		
		Maxima	Minima	Moyenne
1	Gauche	361	207	284
8	Gauche	350	305	328

#### 5.4.3 *DEGARNISSEMENT ET ECLATEMENT DES GRANULATS*

Les figures 5.15 et 5.16 présentent les pourcentages moyens de surface d'éclatement et de dégarnissement des plaques d'écaillage de la phase 3 après 56 cycles de gel-dégel. Les surfaces éclatées obtenues pour les granulats provenant des sources 1 et 8 et impliquant une matrice à haute performance (figure 5.15) sont très similaires aux surfaces éclatées obtenues avec les mêmes sources mais dans une matrice de type V-S (figure 5.5). Cependant, les surfaces dégarnies sont nettement plus faibles dans le cas de la matrice à haute performance (figure 5.16) Une matrice de type XIII semble donc avoir un effet nettement favorable en réduisant les dégarnissements des sources granulaires de la catégorie inférieure. L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 6.



**FIGURE 5.15 - Pourcentage de surface éclatée des bétons de la phase 3**



**FIGURE 5.16 - Pourcentage de surface dégarnie des bétons de la phase 3**

Les courbes détaillées de l'évolution des éclatements et des dégarnissements en fonction du nombre de cycles sont présentées à l'annexe 8.

## 5.5 INFLUENCE D'UNE MATRICE DE BETON DE FAIBLE PERFORMANCE (F2) SUR LA SUSCEPTIBILITE A L'ECLATEMENT / DEGARNISSEMENT – PHASE 4

### 5.5.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La figure 5.17 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 4 en fonction du temps. Les courbes indiquent que pour le béton fabriqué avec le granulat provenant de la source 1, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à l'exigence minimale de 25 MPa exigé (27,5 MPa). Cependant, le béton fabriqué avec le granulat provenant de la source 8 possède une résistance à la compression à 28 jours de 24,9 MPa, ce qui est légèrement inférieur à l'exigence minimale de 25 MPa.

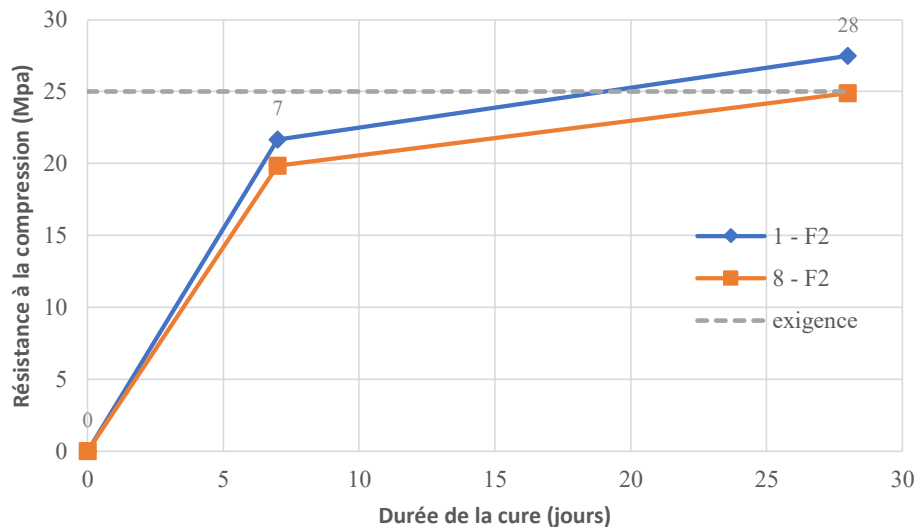


FIGURE 5.17 - Résistance à la compression des bétons de la phase 4

### 5.5.2 DURABILITE A L'ECAILLAGE

Le tableau 5.5 présente les masses de débris ( $\text{g/m}^2$ ) des bétons de la phase 4 obtenues après 56 cycles de gel-dégel. Chaque béton a été utilisé pour produire une paire de plaques placées à gauche de la chambre froide. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques sont présentées en annexe 9. L'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude y est également illustré.

Les masses de débris obtenues avec les plaques associées à la source 1 ne sont pas valides en raison de la fuite de la solution lors des cycles de gel-dégel. Ces fuites n'ont pas pu être détectées ni corrigées car elles se sont produites durant la période de confinement de la COVID-19. Durant cette période, les laboratoires n'étaient alors pratiquement pas accessibles par le personnel technique.

La masse de débris obtenue avec les plaques associées à la source 8 dépasse très nettement l'exigence maximale de 500 g/m<sup>2</sup>. Ce résultat était prévisible compte tenu de la faible durabilité à l'écaillage d'une matrice de type F2. Ce type de matrice ne doit pas être utilisé dans le cas d'une exposition à des cycles de gel-dégel en présence de sels de déglçage.

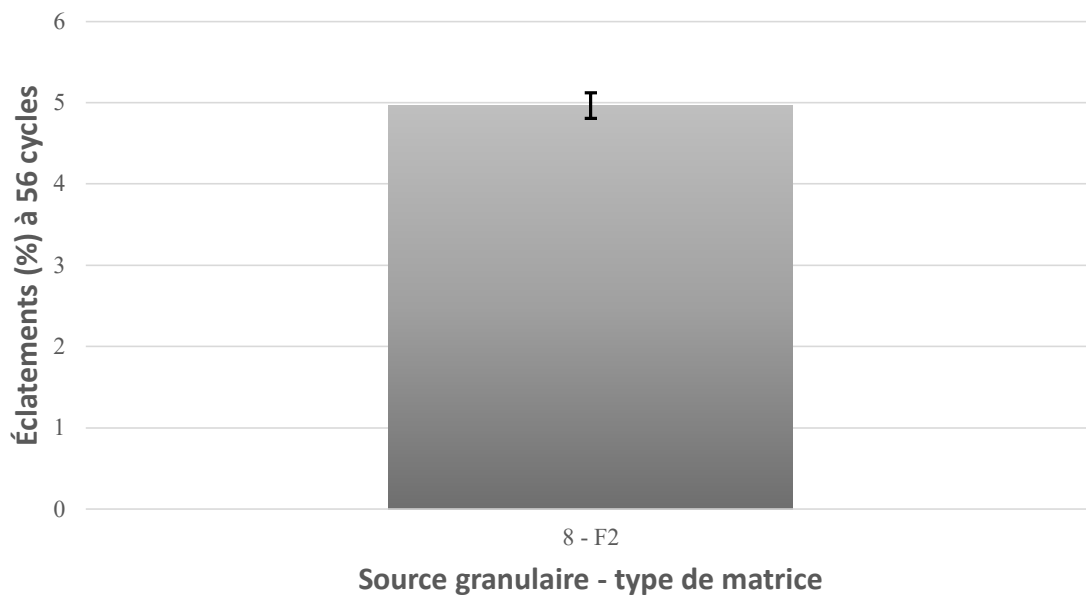
TABLEAU 5.5 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 4

Source de granulat	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [g/m <sup>2</sup> ]		
		Maxima	Minima	Moyenne
1	Gauche	251*	228*	240*
8	Gauche	1346	1085	1216

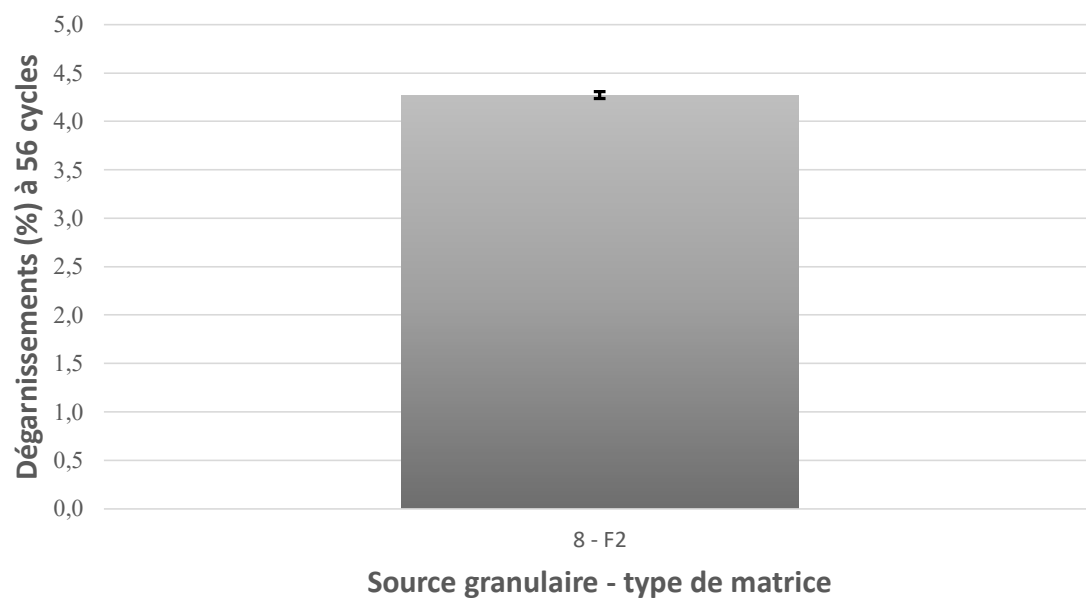
\* Valeurs non valides en raison de la fuite de la solution lors de l'essai d'écaillage

### 5.5.3 *DEGARNISSEMENT ET ECLATEMENT DES GRANULATS*

Les figures 5.18 et 5.19 présentent les pourcentages moyens de surface d'éclatement et de dégarnissement des plaques d'écaillage de la phase 4 après 56 cycles de gel-dégel. Les surfaces éclatées et dégarnies de la source 1 ne sont pas indiquées car les mesures en laboratoire sont invalides en raison de la fuite de la solution lors de l'essai d'écaillage. Les surface éclatées et dégarnies obtenues avec les plaques associées à la source 8 sont très élevées (supérieure à 4 %). Ces résultats suggèrent qu'une matrice de faible performance (classe d'exposition F2) offre une moins bonne protection contre l'endommagement par éclatement et dégarnissement qu'une matrice de type V-S ou une matrice de type XIII. L'analyse détaillée de ces résultats sera effectuée au chapitre 6.



**FIGURE 5.18 - Pourcentage de surface éclatée des bétons de la phase 4**



**FIGURE 5.19 - Pourcentage de surface dégarnie des bétons de la phase 4**

Les courbes détaillées de l'évolution des éclatements et dégarnissements en fonction du nombre de cycles de gel-dégel sont présentées à l'annexe 10.

## 5.6 INFLUENCE D'UNE VARIATION DES CARACTERISTIQUES DU RESEAU D'AIR SUR LA SUSCEPTIBILITE A L'ECLATEMENT / DEGARNISSEMENT – PHASE 5

### 5.6.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La figure 5.20 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 5 en fonction du temps. Les courbes indiquent que pour cette série de bétons, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à l'exigence minimale de 35 MPa.

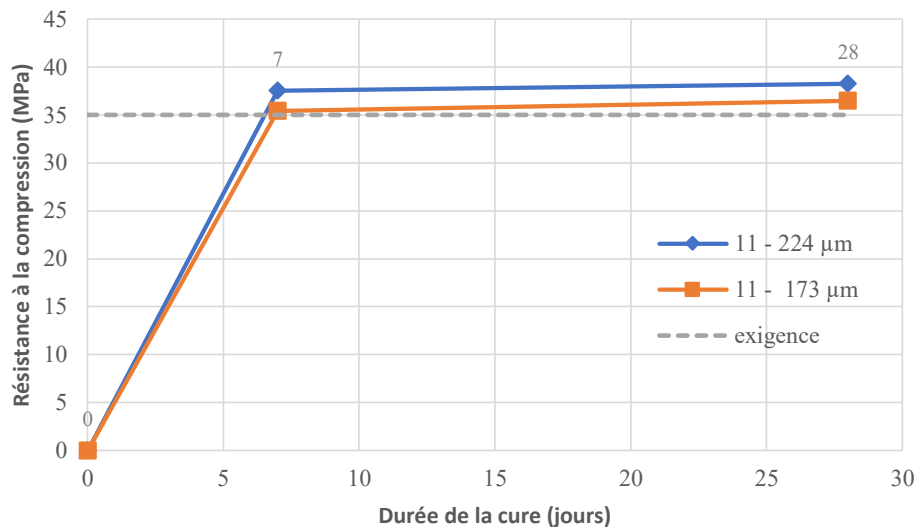


FIGURE 5.20 - Résistance à la compression des bétons de la phase 5

### 5.6.2 DURABILITE A L'ECAILLAGE

Le tableau 5.6 présente les masses de débris ( $\text{g/m}^2$ ) obtenues après 51 cycles de gel-dégel pour les deux bétons de la phase 5. Suite à un arrêt imprévu de la chambre froide (dû à des sondes de température défectueuses), il a été décidé d'interrompre définitivement les cycles car le délai requis pour obtenir de nouvelles sondes était trop long. Il est considéré que les 5 cycles non effectués n'ont pas d'effet significatif sur les résultats et sur les conclusions tirées de ceux-ci puisque les résultats obtenus étaient déjà supérieurs à la limite suggérée de  $500 \text{ g/m}^2$ . Chaque béton a été utilisé pour produire une paire de plaques placées à gauche de la chambre froide. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques sont présentées en annexe 11. L'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude y est également illustré.



Les valeurs de  $\bar{L}$  obtenues sont inférieures aux valeurs visées. Le premier béton visait un  $\bar{L}$  supérieur à 350  $\mu\text{m}$  alors que le  $\bar{L}$  réel est de 224  $\mu\text{m}$ . C'est également le cas pour le second béton pour lequel un  $\bar{L}$  entre 250 et 350  $\mu\text{m}$  était visé. Un  $\bar{L}$  de 173  $\mu\text{m}$  a ainsi été obtenu. Il est très difficile de prévoir le  $\bar{L}$  à partir du seul dosage de l'AEA. Les dosages en AEA ont pourtant été choisis pour espérer des  $\bar{L}$  dans les plages visées selon les travaux de P.O. Morin-Morisette [19]. Malheureusement, cela n'a pas été possible, probablement en raison de la très grande efficacité de l'AEA utilisé pour ce projet qui diffère de celui de P.O. Morin-Morisette, et est plus efficace.

Les résultats du tableau 5.6 montrent que les masses de débris des deux bétons de cette phase sont supérieures à l'exigence maximale de 500  $\text{g/m}^2$ . C'est aussi le cas de la quasi-totalité des autres bétons de type V-S fabriqués avec le liant ternaire GUb-S/SF (phase 1 et 2). Cependant, pour cette phase, les masses de débris de 800 et 872  $\text{g/m}^2$  obtenues après 51 cycles sont supérieures à la masse de débris de 664  $\text{g/m}^2$  obtenues avec les plaques associées à la source 11 et testées dans le cadre de la phase 1.

TABLEAU 5.6 - Masse de débris après 51 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 5

Source granulaire - $\bar{L}$	Emplacement	Perte massique à 51 cycles [ $\text{g/m}^2$ ]		
		Maxima	Minima	Moyenne
11 - 224 $\mu\text{m}$	Gauche	1002	742	872
11 - 173 $\mu\text{m}$	Gauche	893	707	800

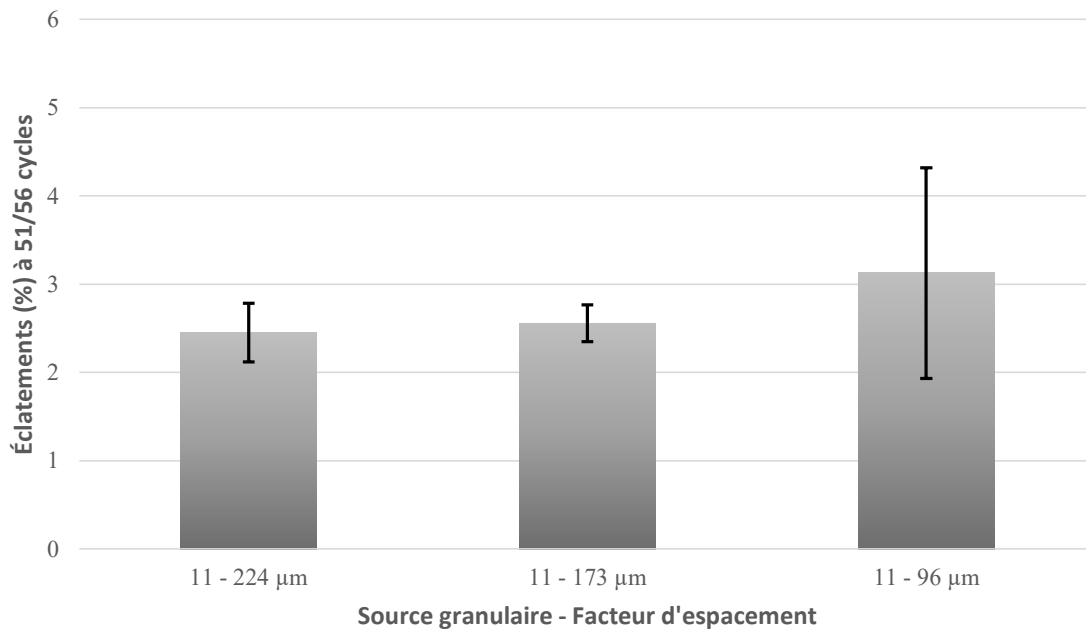
### 5.6.3 DEGARNISSEMENT ET ECLATEMENT DES GRANULATS

Les figures 5.21 et 5.22 présentent les pourcentages moyens de surface d'éclatement et de dégarnissement des plaques d'écaillage de la phase 5 après 51 cycles de gel-dégel. Cette figure inclue aussi les résultats obtenus avec les plaques associées à la source 11 dans le cadre de la phase 1 ( $\bar{L} = 96 \mu\text{m}$ ). Ainsi, il n'y a aucun facteur d'espacement inférieur à 230  $\mu\text{m}$ , exigence de la norme CSA A23.1 [17].

Les résultats des figures 5.21 et 5.22 suggèrent que le facteur d'espacement de la matrice de béton a peu d'influence sur l'intensité des surfaces éclatées ou dégarnies des bétons fabriqués avec la source granulaire 11, du moins lorsque le facteur d'espacement est

inférieur à la valeur critique de 230  $\mu\text{m}$ . Néanmoins, les valeurs de débris massiques inférieures avec un facteur d'espacement plus élevé peuvent être dû aux 5 cycles de gel-dégel manquant.

L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 6. Les courbes détaillées de l'évolution des éclatements et des dégarnissements en fonction du nombre de cycles de gel-dégels sont présentés à l'annexe 12.



**FIGURE 5.21 - Pourcentage de surface éclatée des bétons de la phase 5**

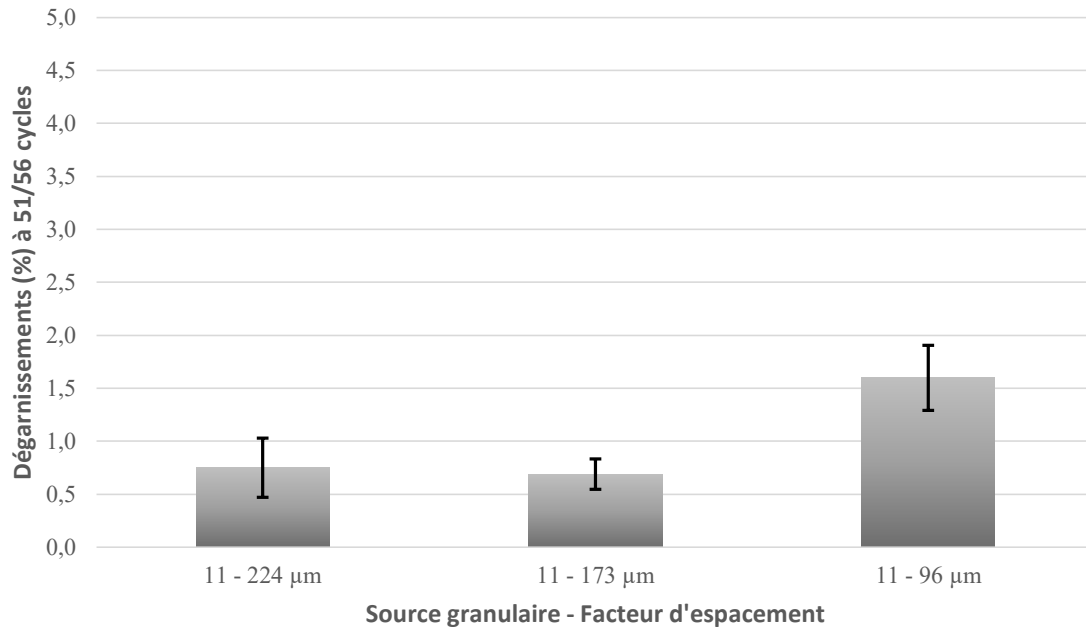


FIGURE 5.22 - Pourcentage de surface dégarnie des bétons de la phase 5

## 5.7 INFLUENCE DU GEOTEXTILE SUR LA RESISTANCE A L'ECAILLAGE D'UN BETON DE CLASSE C2 – PHASE 6

### 5.7.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La figure 5.23 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 6 en fonction du temps. Les courbes indiquent que la résistance à la compression à 28 jours des deux bétons de cette phase est supérieure à l'exigence minimale de 32 MPa.

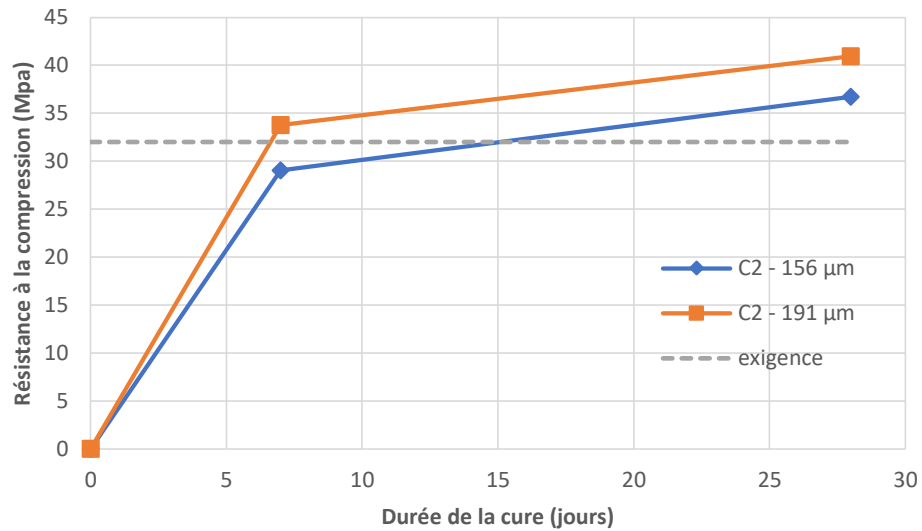


FIGURE 5.23 - Résistance à la compression des bétons de la phase 6

### 5.7.2 DURABILITÉ À L'ÉCAILLAGE

Le tableau 5.7 présente les masses de débris ( $\text{g/m}^2$ ) obtenues après 56 cycles de gel-dégel pour les quatre conditions d'essai de la phase 6. Chaque béton a été utilisé pour produire deux paires de plaques placées à gauche de la chambre froide. Une paire de plaques a été produite selon la norme BNQ 2621-905 Annexe B (géotextile déposé au fond du moule et retiré avant la mise en chambre froide), l'autre paire fabriquée en même temps avec le même béton ne comporte pas de géotextile. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques sont présentées en annexe 13. L'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude y est également illustré.

Le tableau 5.7 montre que les masses de débris obtenues avec les autres conditions d'essais de cette phase sont largement inférieures à la limite de  $500 \text{ g/m}^2$ . Il faut rappeler que tous ces bétons ont été fabriqués avec un ciment GU. Ces résultats suggèrent que le ciment GU semble plus durable à l'écaillage que le liant ternaire GUb-S/SF utilisé pour les phases 1, 2, 3 et 5.

TABLEAU 5.7 - Masse de débris après 51 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 6

$\bar{L}$ - Géotextile	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [g/m <sup>2</sup> ]		
		Maxima	Minima	Moyenne
156 $\mu\text{m}$	Gauche	190	162	176
156 $\mu\text{m}$ - GTX	Gauche	88	87	88
191 $\mu\text{m}$	Gauche	224	199	212
191 $\mu\text{m}$ - GTX	Gauche	330	327	329

### 5.7.3 *DEGARNISSEMENT ET ECLATEMENT DES GRANULATS*

Les figures 5.24 et 5.25 présentent les pourcentages moyens de surface d'éclatement et de dégarnissement des plaques d'écaillage de la phase 6 après 56 cycles de gel-dégel. Les résultats des figures 5.24 et 5.25 montrent clairement que la présence ou l'absence d'un géotextile en fond de moule n'a aucun effet sur l'intensité des surfaces éclatées ou dégarnies dans le cas du béton de type C2 fabriqué avec un liant de type GU et un gros granulat dont la durabilité est démontrée (granulat de l'Université de Sherbrooke). L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 6. Les courbes détaillées de l'évolution des éclatements et des dégarnissements en fonction du nombre de cycles de gel-dégel sont présentées à l'annexe 14.

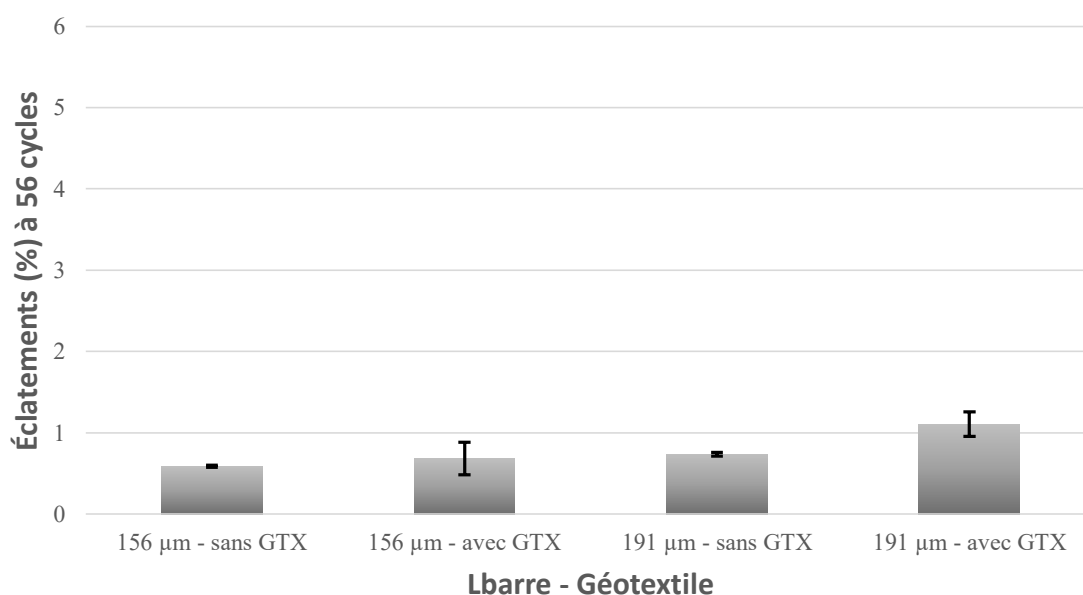
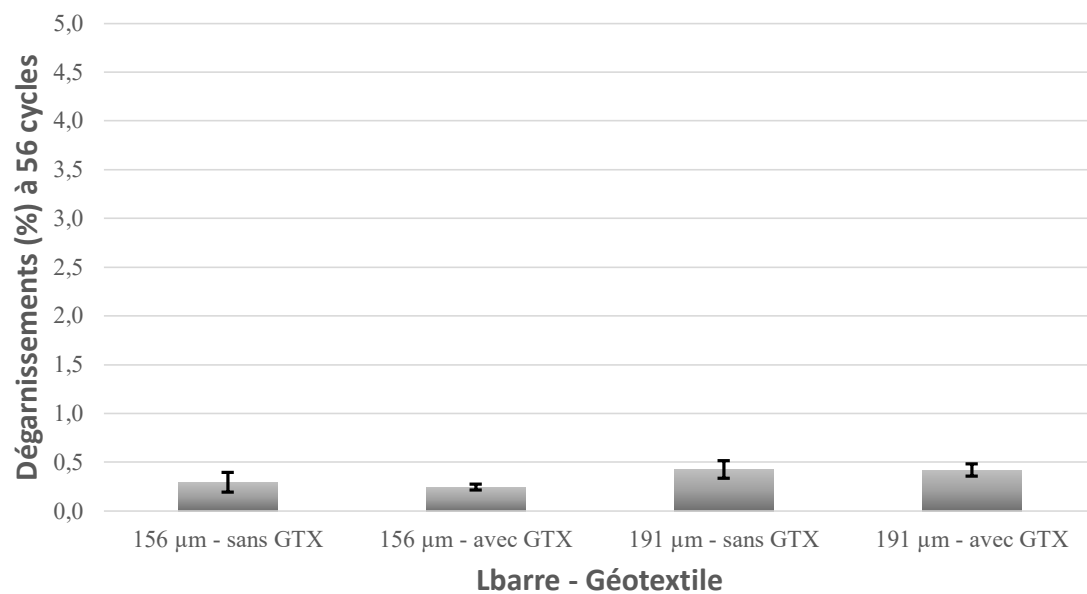


FIGURE 5.24 - Pourcentage de surface éclatée des bétons de la phase 6



**FIGURE 5.25 - Pourcentage de surface dégarnie des bétons de la phase 6**

## **Chapitre 6 : ANALYSE GÉNÉRALE INTERPHASE**

Ce chapitre présente l'analyse détaillée des résultats expérimentaux présentés au chapitre 5. Cette analyse est divisée en sept sections qui portent sur les différents sous objectifs du projet.

### **6.1 EMBLACEMENT DANS LA CHAMBRE FROIDE**

Un des objectifs de la phase 1 est de valider l'homogénéité des conditions d'essais dans la chambre d'écaillage et de choisir une localisation unique pour les autres phases de l'étude. À cette étape, il est juste de mentionner qu'il y a peu de variations associées à la localisation dans la chambre. En effet, les résultats présentés à la figure 5.4 ne permettent pas de mettre en avant un effet de la localisation des plaques sur les résultats à l'essai d'écaillage.

Par conséquent, même si l'homogénéité n'est pas parfaite dans la chambre froide, elle est jugée tout à fait acceptable pour réaliser le reste du programme expérimental. L'emplacement gauche a été choisi car la paire de plaques placée à cet endroit lors de la phase 1 n'a jamais présenté une des valeurs extrêmes des trois moyennes. Cela explique la position indiquée dans la colonne « emplacement » des tableaux présentant les résultats aux essais d'écaillage du Chapitre 5 pour les phases 2 à 6.

### **6.2 ÉTUDE DE LA RELATION ENTRE LES DÉBRIS MASSIQUES ET LES CARACTÉRISTIQUES D'UN GRANULAT**

Cette analyse vise à déterminer s'il est possible d'établir un lien entre les pertes aux essais de gel-dégel non confiné et Micro Deval et l'intensité des pertes massiques à l'essai d'écaillage. Elle se base sur les résultats de la phase 1 qui consistait à produire sept bétons avec sept sources granulaires (3 paires de plaques pour chacune des sources). Les sources sont 1, 8, 3, 11, 14, 2 et 12 dans leur ordre de classification définie au début du projet (Inférieure : sources 1 et 8 – Intermédiaire : sources 3, 11 et 14 – Supérieure : sources 2 et 12).

Les résultats de la figure 6.1 montrent la masse des débris après 56 cycles de gel-dégel en fonction de la source granulaire. Les traits verticaux indiquent les valeurs minimales et

maximales obtenues avec les six plaques. Trois sources (1, 8 et 11) ont une masse de débris dans la plage  $650 \pm 50 \text{ g/m}^2$ . Les quatre autres sources ont une masse de débris dans la plage  $450 \pm 50 \text{ g/m}^2$ . Globalement, il n'y a pas de relation claire entre les masses de débris et les pertes au gel-dégel non confiné et Micro Deval.

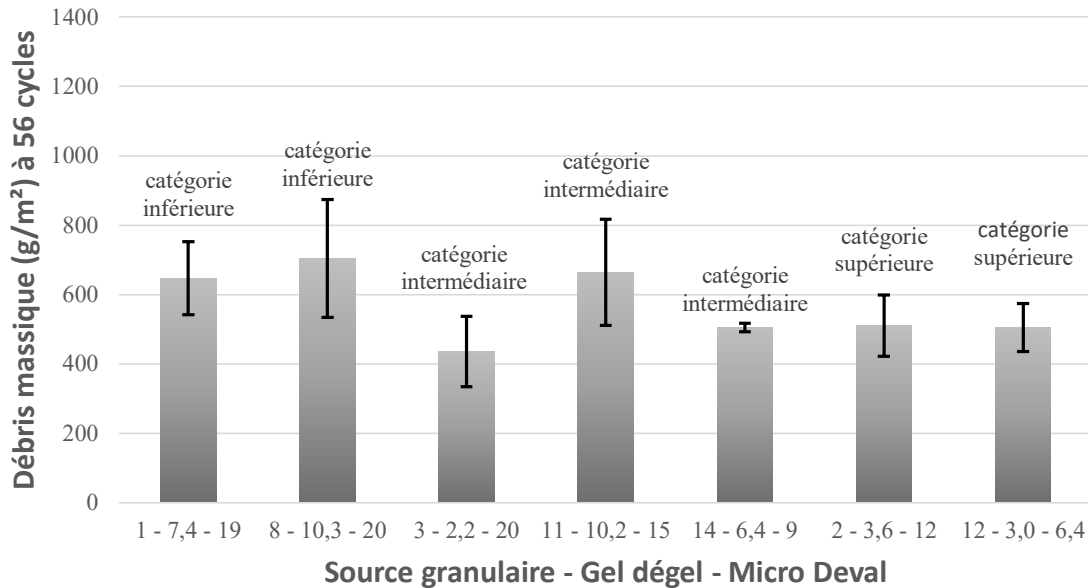


FIGURE 6.1 - Débris massique à 56 cycles en fonction de la source granulaire

Les figures 6.2 et 6.3 présentent plus spécifiquement les relations entre la perte au gel-dégel non confiné et la masse de débris (figure 6.2) et la relation entre la perte Micro Deval et la masse de débris (figure 6.3). Chaque point sur ces graphiques représente la moyenne des essais réalisés pour chacun des groupes d'échantillons testés.

Les résultats de la figure 6.2 montrent que les masses de débris les plus faibles ( $450 \pm 50 \text{ g/m}^2$ ) sont obtenues avec les sources granulaires ayant une perte au gel-dégel inférieure à 7 %. Les sources granulaires ayant une perte au gel-dégel non confiné supérieure à 7 % ont produit des masses de débris plus élevées, dans la plage  $650 \pm 50 \text{ g/m}^2$ . Pour chacune de ces deux familles de résultats, il ne semble pas y avoir de relation entre l'intensité de la perte au gel-dégel et l'intensité de la masse des débris. C'est-à-dire que pour les pertes au



gel-dégel inférieures à 7 %, la masse de débris est globalement peu variable. Le même constat s'applique aussi à la catégorie des pertes au gel-dégel supérieures à 7 %.

La figure 6.3 présente la relation entre la perte Micro Deval et la masse de débris. Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de relation entre la perte Micro Deval et la masse des débris. Il est seulement constaté que pour les pertes Micro Deval les plus élevées (supérieure à 14 %) la masse des débris est plus variable ( $600 \pm 150 \text{ g/m}^2$ ).

Globalement, la corrélation est faible entre la masse des débris et les pertes au gel-dégel non confiné et Micro Deval. Ce résultat était prévisible puisque la majorité de la masse des débris provient de l'endommagement du mortier.

Il est tout de même intéressant d'essayer de quantifier cette proportion de débris issus de l'endommagement des granulats. C'est l'objet du paragraphe suivant.

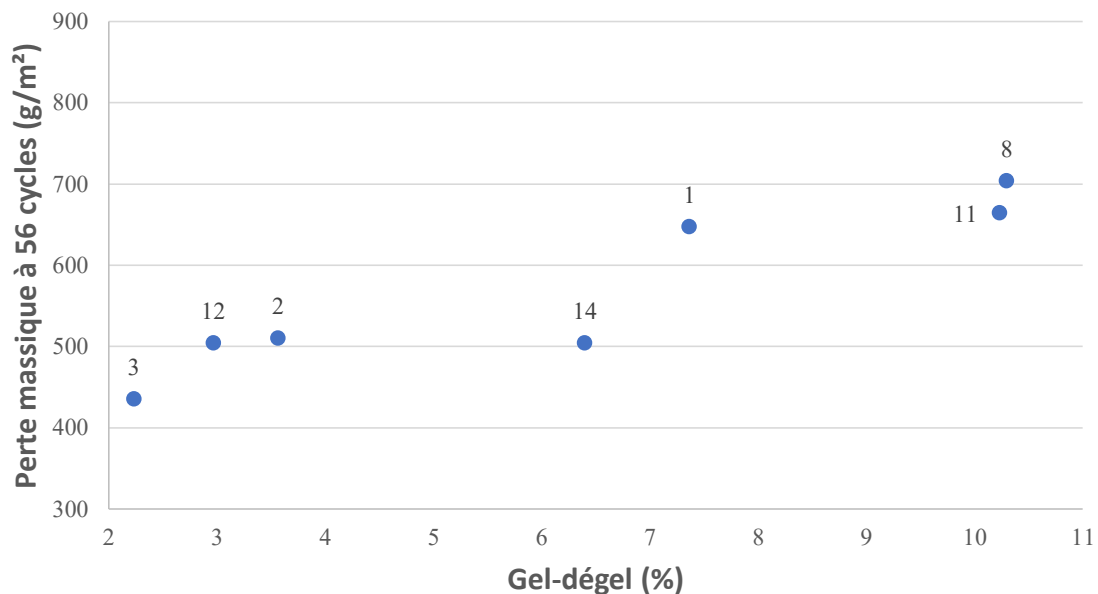


FIGURE 6.2 - Perte massique à l'écaillage en fonction de la résistance au gel-dégel non confiné

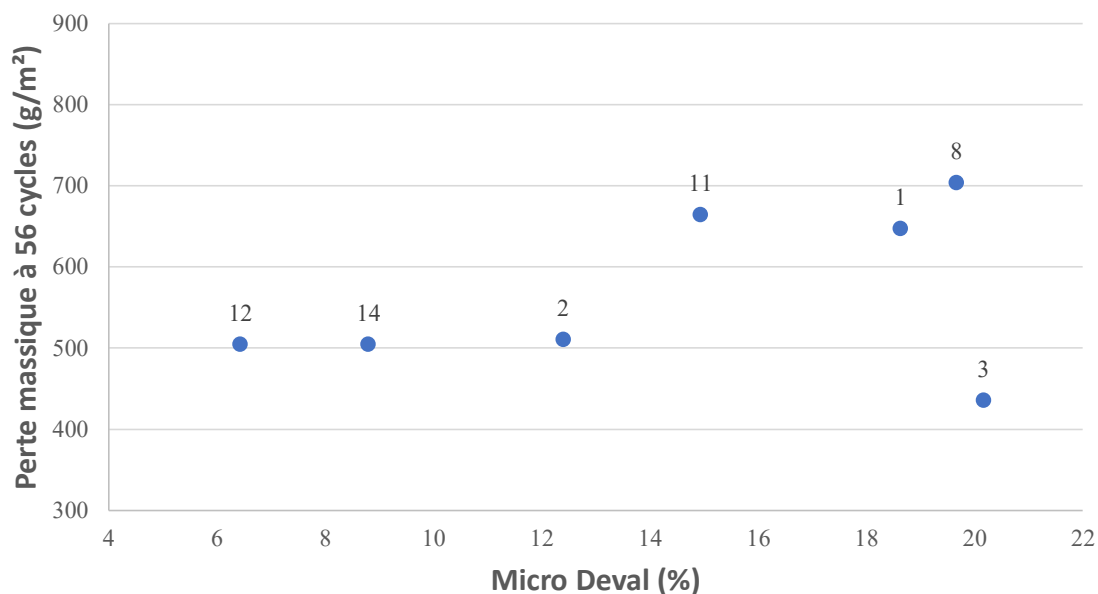


FIGURE 6.3 - Perte massique à l'écaillage en fonction de la résistance au Micro Deval

### 6.2.1 ESTIMATION DE LA MASSE DES DÉBRIS ASSOCIÉE À L'ENDOMMAGEMENT SPÉCIFIQUE DU GROS GRANULATS

Cette partie de l'analyse vise à estimer l'apport réel de l'endommagement des granulats sur la masse de débris à l'écaillage. La figure 6.4 montre un exemple des débris totaux après 56 cycles d'écaillage. Les débris provenant de l'endommagement du gros granulat apparaissent comme des grosses particules plates et plus foncées (flocons). Ces flocons dus aux éclatements paraissent présenter une proportion massique significative des débris totaux.



**FIGURE 6.4 - Exemple de débris massiques à l'écaillage obtenus après 56 cycles de gel-dégel (source 8, phase 4)**

Une analyse granulométrique réalisée à la main de ces débris a été réalisée pour tenter de séparer les débris provenant des gros granulats de ceux provenant de l'endommagement du mortier. Les fractions obtenues sont présentées à la figure 6.5. Il est constaté que les débris de granulats (particules noires) se retrouvent dans toutes les fractions granulaires. Il n'est donc pas possible d'identifier une dimension spécifique correspondant à des débris provenant des granulats. Cependant, les photos de la figure 6.5 montrant les particules retenues sur les tamis 5 et 2,5 mm proviennent exclusivement de l'endommagement des gros granulats (tous les débris sont très foncés). Les particules retenues sur le tamis 1,25 mm sont constituées d'un mélange de débris de mortier et de granulat ; toutefois, la majeure partie provient des granulats. Ces résultats suggèrent que l'endommagement des granulats engendre des débris de dimension relativement importante (supérieure à 1,25 mm).



FIGURE 6.5 - Exemple de débris massique à l'essai d'écaillage retenu au tamis 5 mm, 2,5 mm, 1,25 mm, 630  $\mu$ m et au plat

Cette première analyse de la géométrie des débris d'écaillage permet de formuler l'hypothèse que les débris provenant des granulats ont la forme de flocons relativement aplatis. À partir de cette hypothèse, il est possible d'estimer la masse des débris provenant des granulats à partir des mesures des pourcentages de surface éclatées et dégarnies. Néanmoins, il est à prendre en compte que la couleur foncée et les particules aplatis des flocons s'appliquent ici pour les trois sources qui ont pu faire l'étude : la source 1 (pierre calcaire), la source 8 (roche sédimentaire) et la source de l'Université de Sherbrooke (pierre calcaire). Il pourrait être intéressant de compléter ce début d'étude avec les autres sources

granulaires utilisées dans ce projet. Dans le cas des éclatements, une estimation des débris massiques uniquement dus aux granulats a été effectuée à partir de l'équation suivante :

$$m = e_{th} \cdot \frac{S}{100} \cdot d \times 1000$$

Où  $m$  est l'estimation de la masse de débris dus aux éclatements ( $\text{g/m}^2$ ),  $e_{th}$  est l'épaisseur théorique d'un flocon éclaté (mm),  $S$  est le pourcentage de surface éclatée (mesurée par analyse d'image) et  $d$  est la densité relative SSS du granulat étudié.

Pour comprendre les dimensions des flocons d'éclatement, la figure 6.6 présente un exemple. Pour cette estimation, l'épaisseur théorique  $e_{th}$  a été fixée à 1 mm. Cette valeur donne une masse  $m$  proche de la masse des débris cumulés sur les tamis 5, 2,5 et 1,25 mm (figure 6.5). Elle a été fixée à 1 mm pour toutes les sources granulaires.

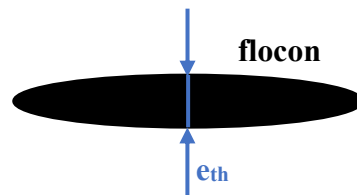


FIGURE 6.6 - Schéma explicatif de l'épaisseur théorique d'un flocon d'éclatement

Dans le cas des dégarnissements, la même équation a été utilisée. Le dégarnissement est un flocon de pâte. L'épaisseur théorique de 1 mm est conservée. La densité relative de la pâte est fixée à 2,0 car il s'agit de béton contenant de l'air entraîné.

Le tableau 6.1 présente les masses de débris estimées dus aux éclatements et aux dégarnissements pour chaque source granulaire, calculées selon l'approche décrite précédemment. La deuxième colonne présente la masse totale des débris massiques avec l'essai d'écaillage. Les troisième et quatrième colonnes présentent respectivement les masses estimées par calcul des débris provenant des éclatements et des dégarnissements. La cinquième colonne est la somme des troisième et quatrième colonnes. Elle correspond à l'estimation des débris spécifiquement dus aux gros granulats. La sixième colonne est l'estimation (en pourcentage) des débris spécifiquement dus aux gros granulats sur la masse totale des débris. La dernière colonne est la masse des débris spécifiquement due au

mortier. Elle correspond à la masse totale de débris (deuxième colonne) moins la masse de la cinquième colonne).

TABLEAU 6.1 - Masses de débris estimées

Source granulaire	Masse mesurée de débris totale [g/m <sup>2</sup> ]	Masse estimée de débris dus aux éclatements [g/m <sup>2</sup> ]	Masse estimée de débris dus aux dégarnissements [g/m <sup>2</sup> ]	Masse de débris dus aux gros granulats [g/m <sup>2</sup> ]	Débris dus aux gros granulats [%]	Masse estimée de débris dus au mortier [g/m <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	647	56	35	91	14	556
<b>8</b>	704	107	25	132	19	572
<b>3</b>	435	38	36	74	17	362
<b>11</b>	664	84	32	116	18	541
<b>14</b>	505	34	20	54	11	451
<b>2</b>	511	17	59	78	15	434
<b>12</b>	505	43	21	64	13	441

Dans le cas de la matrice V-S étudiée (masse des débris totale compris entre 435 et 704 g/m<sup>2</sup>), les granulats (éclatement et dégarnissement) contribuent entre 11 et 19 % de la masse de débris à l'essai d'écaillage. Il peut donc être important d'en tenir compte lors de l'analyse de la durabilité à l'écaillage d'un béton. Pour la matrice et les sources granulaires étudiées, les éclatements ont une contribution supérieure à celle des dégarnissements. Seule la source 2 fait exception.

Il faut noter que dans le cas d'une matrice de béton plus performante à l'écaillage, par exemple une matrice ayant une masse de débris de l'ordre de 250 g/m<sup>2</sup>, la contribution des granulats dans la masse de débris pourrait être significativement plus élevée que les proportions de 11 à 19 % obtenues par cette étude. Cette hypothèse pourrait être vérifiée

par une étude complémentaire sur l'utilisation d'une matrice type XIII et une matrice type F2.

La figure 6.7 présente une relation intéressante entre la somme des pertes au gel-dégel non confiné et Micro Deval et la masse estimée des débris provenant spécifiquement des particules du gros granulat. Une tendance nette est observée et montre qu'une augmentation de la perte combinée (gel-dégel non confiné et Micro Deval) engendre une augmentation de la masse estimée des débris dus aux gros granulats. Les sources 1, 8 et 11 ayant les pertes au gel-dégel non confiné les plus élevées, apparaissent les moins durables. Ces résultats suggèrent qu'une perte combinée d'environ 22 % pourrait être une valeur limite maximale pour la sélection d'une source granulaire dans un béton soumis à une exposition sévère aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déglacage.

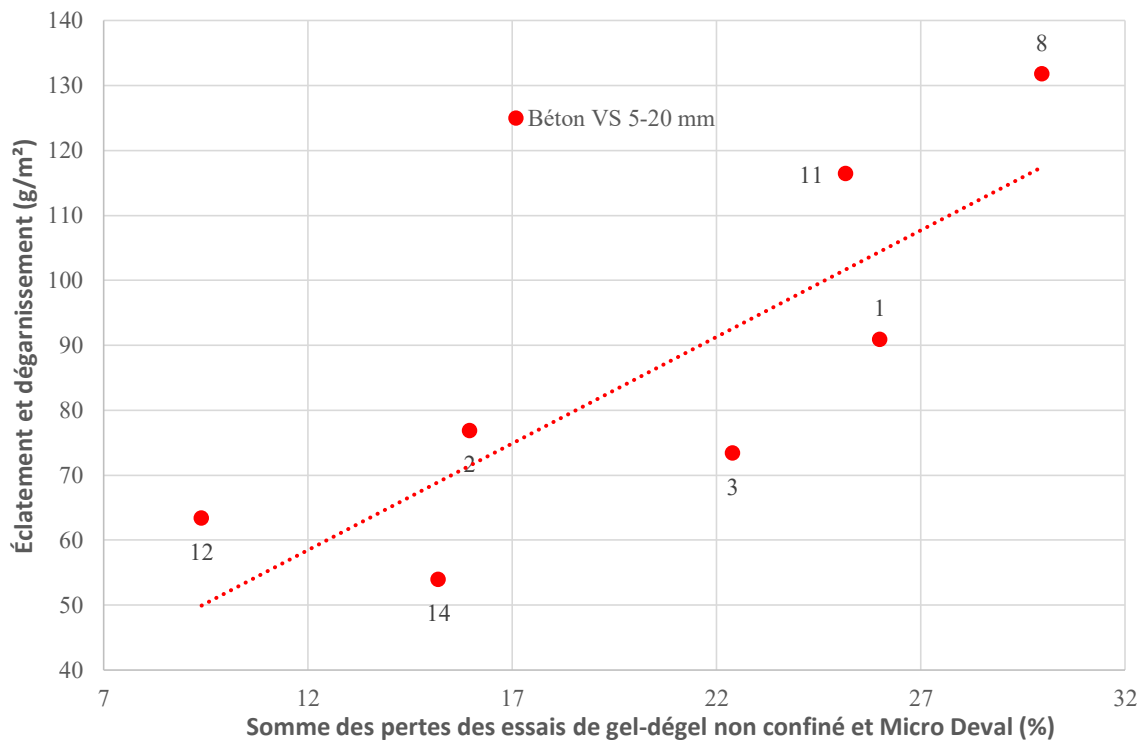


FIGURE 6.7 - Corrélation entre les éclatements et dégarnissements (g/m<sup>2</sup>) avec la somme des pertes massiques au gel-dégel non confiné et Micro Deval

### **6.3 CORRÉLATION ENTRE LES ÉCLATEMENTS ET LES DÉGARNISSEMENTS ET LES CARACTÉRISTIQUES D'UN GRANULAT**

La mesure par la méthode optique des surfaces d'éclatements et de dégarnissements sont présentées à la section 5.2.3.

Comme le montre la figure 5.6, le dégarnissement du granulat n'est pas bien corrélé à la résistance au gel-dégel non confiné : la source 3 qui a une perte massique de 2,2 % au gel-dégel non confiné montre autant de granulats dégarnis que la source 1 qui a une réponse au gel-dégel non confiné de 7,4 % au même essai. Cependant, le dégarnissement semble être mieux corrélé avec la perte Micro Deval (résistance à l'abrasion). En effet, à l'exception de la source 2, la surface de dégarnissement diminue avec les pertes massiques à l'abrasion : c'est particulièrement le cas pour les sources granulaires de catégories intermédiaires (3, 11 et 14). Une faible perte Micro Deval pourrait indiquer une surface du granulat solide et de bonne qualité, offrant une bonne adhérence avec la pâte de ciment. Cette bonne affinité entre la pâte et le granulat pourrait contribuer à limiter le dégarnissement (décollement de la pâte à la surface de la particule).

La figure 5.5 montre que les éclatements semblent se corrélérer davantage à la perte au gel-dégel non confiné qu'à la perte Micro Deval. Les bétons qui ont plus de 2 % en moyenne de surface éclatées sont ceux dont les granulats ont eu une perte massique au gel-dégel non confiné de plus de 7 %. Ce sont également les granulats avec les meilleures résistances au gel-dégel qui ont le moins éclaté : la source 3 avec 1,4 % de surface éclatée pour 2,2 % de perte massique, la source 2 avec 0,66 % de surface éclatée pour une perte massique de 3,6 % et la source 12 avec 1,52 % de surface éclatée pour 4,0 % de perte massique à l'essai de gel-dégel non confiné. De plus, les courbes d'évolutions des éclatements et dégarnissements (Annexe 4) montrent que les éclatements apparaissent toujours plus tard que les dégarnissements. Cela suggère que la matrice qui recouvre la particule peut la protéger. Lorsqu'elle disparaît, les granulats dégarnis commencent à éclater lorsqu'ils sont plus directement exposés à la solution saline. Ces conditions se rapprochent de celles de l'essai de gel-dégel non confiné.



La figure 6.8 montre la relation entre la perte au gel-dégel et la surface des éclatements. Il est constaté qu'il existe une légère tendance qui montre une augmentation de la surface éclatée pour les granulats montrant des pertes plus importantes au gel dégel non confiné. Ces résultats suggèrent deux catégories de performance. Les granulats avec une perte au gel-dégel non confiné inférieure à 7 % ont une surface d'éclatement inférieure à 2 % lors de l'essai d'écaillage, alors que les granulats avec une perte gel-dégel supérieure à 7 % ont une surface d'éclatement supérieure à 2 %.

Même si une certaine tendance peut être dégagée dans les relations entre l'éclatement et la résistance au gel-dégel d'un granulat et entre le dégarnissement et la résistance au Micro Deval, certains résultats sont très éloignés de cette tendance, ce qui entraîne un coefficient de régression linéaire inférieur à 0,45. Il est donc difficile de conclure immédiatement sur ces relations.

La figure 6.9 présente la relation entre la perte la perte Micro Deval et la surface de dégarnissement. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de relation évidente entre ces deux paramètres. La source 2 semble un cas d'exception. Elle montre 3 % de dégarnissement avec une perte Micro Deval intermédiaire de 12 %. Une analyse plus approfondie montre que le granulat prélevé à cette source était très « sale ». Les particules du gros granulat étaient en effet toutes recouvertes d'une couche de particules très fines. Puisque les granulats n'ont pas été lavés avant d'être utilisés pour produire les bétons. En effet, la granulométrie de la source 2 présente des non-conformités avec la norme CSA A23.1 [17] pour les masses retenues sur les tamis de 5 et 2,5 mm pour un fuseau de 5 – 20 mm. Il y a donc beaucoup de particules de dimension d'un sable. De plus, l'essai de particules très fines présente également une non- conformité à l'exigence de 1 % de la norme CSA A23.1 [17]. Il est donc très probable que la couche de poussière sur les particules du gros granulat de la source 2 ait pu diminuer l'adhérence avec la matrice de pâte de ciment. Cela peut alors favoriser une plus grande susceptibilité au dégarnissement.

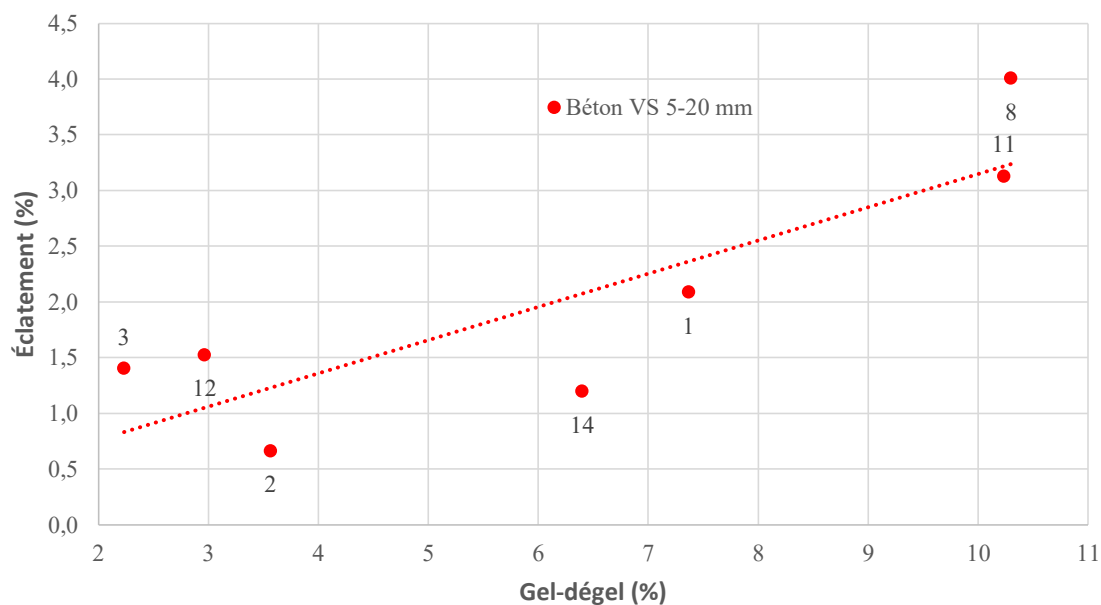


FIGURE 6.8 - Corrélation entre la surface d'éclatements et la résistance au gel-dégel non confiné

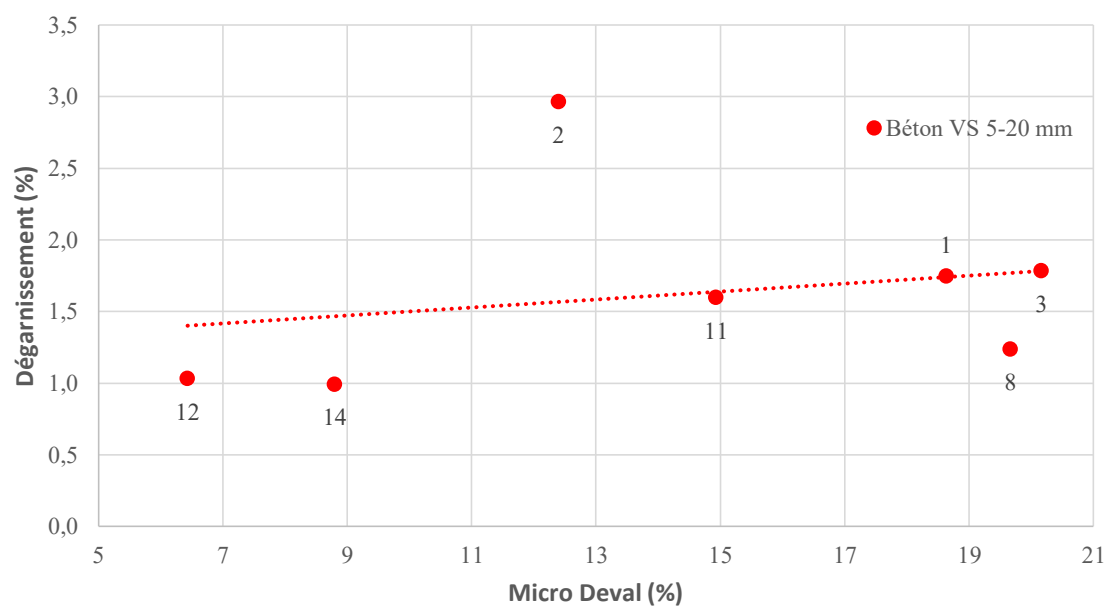
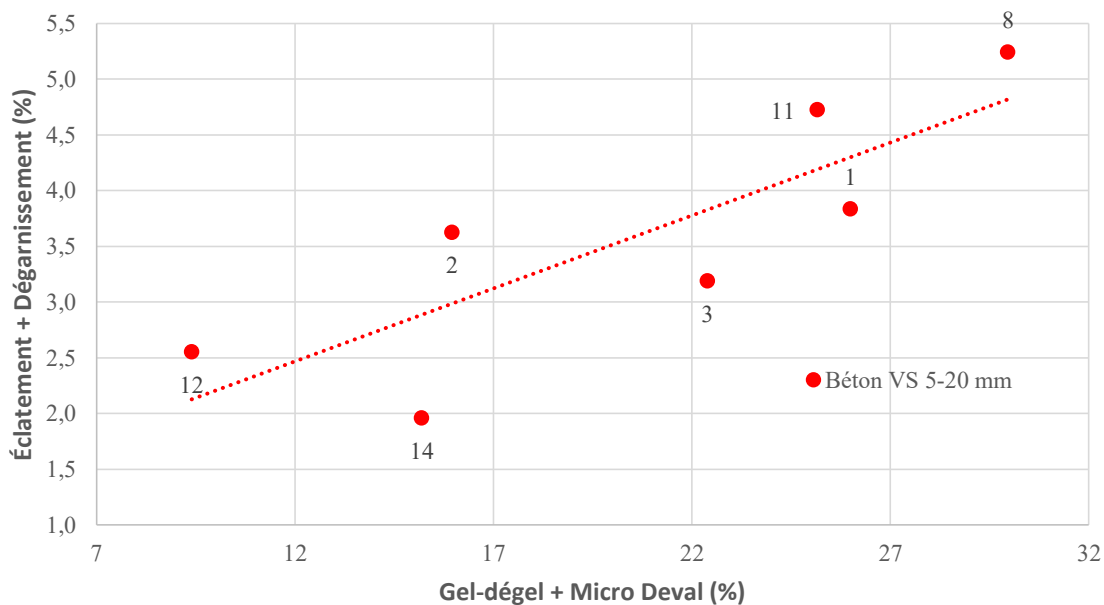


FIGURE 6.9 - Corrélation entre la surface de dégarnissements et la résistance au Micro Deval

Si le résultat associé à la surface 2 est retiré de l'analyse, une relation un peu plus nette se dégage entre la perte Micro Deval et la surface dégarnie. Cela suggère que la perte Micro Deval pourrait être un indice pour la susceptibilité au dégarnissement des sources granulaires.

L'analyse suggère qu'une perte au gel-dégel non confiné élevée semble indiquer une plus grande susceptibilité à l'éclatement du granulat et qu'une perte élevée au Micro Deval semble correspondre à une plus grande susceptibilité au dégarnissement du granulat. La figure 6.10 présente la relation entre la somme de ces deux pertes aux essais sur granulats et la surface totale des éclatements et des dégarnissements. La tendance générale montre que plus la somme des pertes est élevée, plus la surface d'endommagement des granulats est importante.

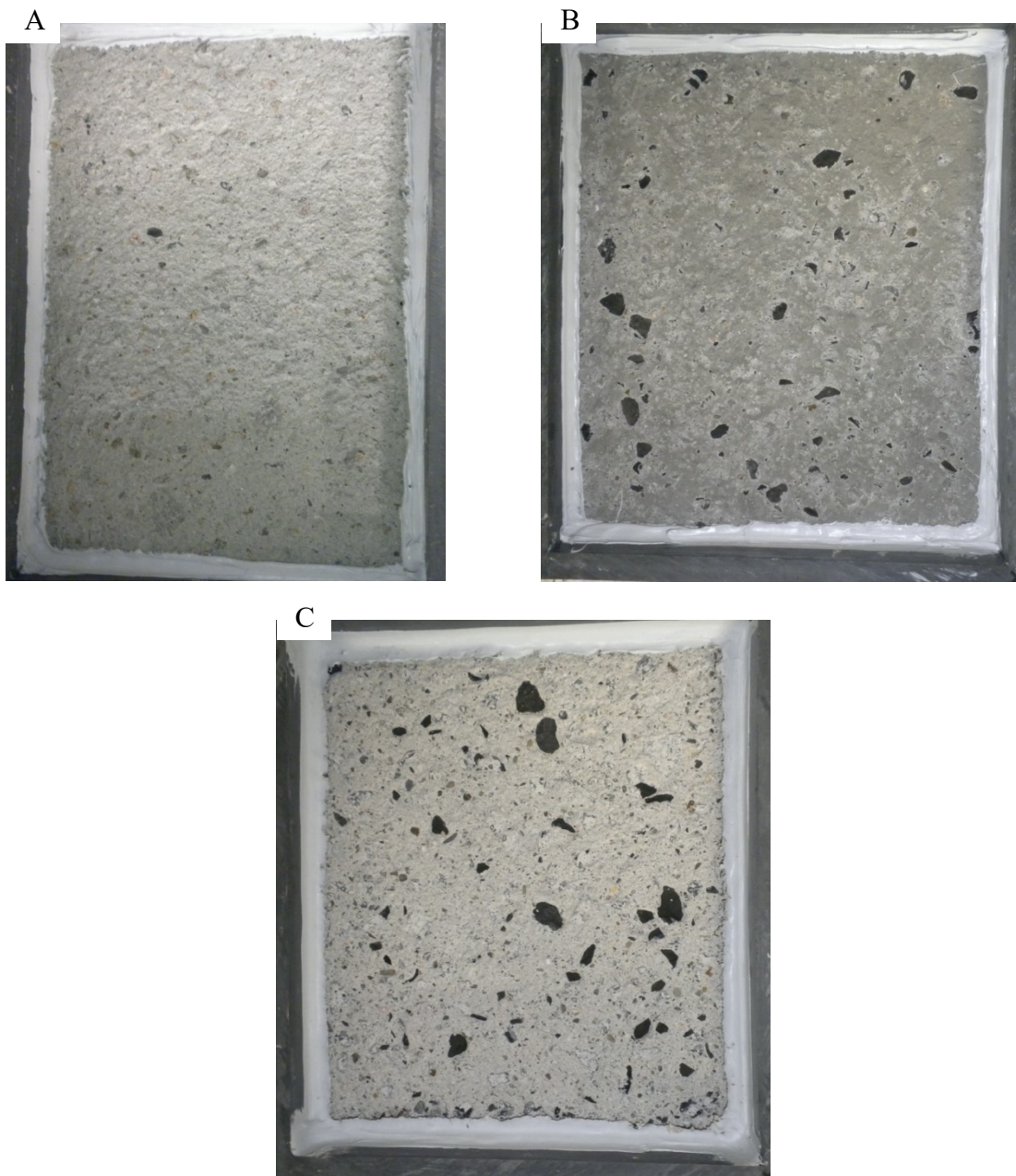
Une somme (gel-dégel non confiné et Micro Deval) inférieure à 23 % correspond à des surfaces d'endommagement de moins de 3,6 %. Ces résultats suggèrent que cette somme pourrait être utilisée comme critère d'estimation de la susceptibilité des granulats à l'endommagement lors d'une exposition à des cycles d'écaillage.



**FIGURE 6.10 - Corrélation entre la somme des surfaces d'éclatements et dégarnissements et la somme des résistances au gel-dégel non confiné et au Micro Deval**

De plus, l'utilisation de la combinaison des éclatements et de dégarnissements est d'autant plus cohérente d'un point de vue pratique car un propriétaire d'ouvrage ne jugera probablement pas l'esthétique de ses éléments de béton uniquement à partir des éclatements ou des dégarnissements, mais bien en comprenant les deux types de désordre.

Comme le montrent les images de la figure 6.11, il peut y avoir des bétons présentant beaucoup de dégarnissements, beaucoup d'éclatements ou encore les deux.



**FIGURE 6.11 - Exemples de plaques présentant : A) beaucoup de dégarnissements; B) beaucoup d'éclatements; C) beaucoup de dégarnissements et d'éclatements**

## 6.4 INFLUENCE DE LA DIMENSION MAXIMALE DU GROS GRANULAT

L'influence de la dimension maximale du gros granulat fait l'objet des essais de la phase 2. Les bétons de la phase 1 produits avec les granulats provenant des sources 1, 3, 8 et 11 ont été reproduits, mais cette fois en utilisant un gros granulat de calibre 5 – 14 mm.

Les résultats des essais d'écaillage des phases 1 et 2 ont permis d'établir un histogramme mettant en évidence l'influence de la dimension maximale du gros granulat sur les pertes massiques après 56 cycles de gel-dégel (figure 6.12).

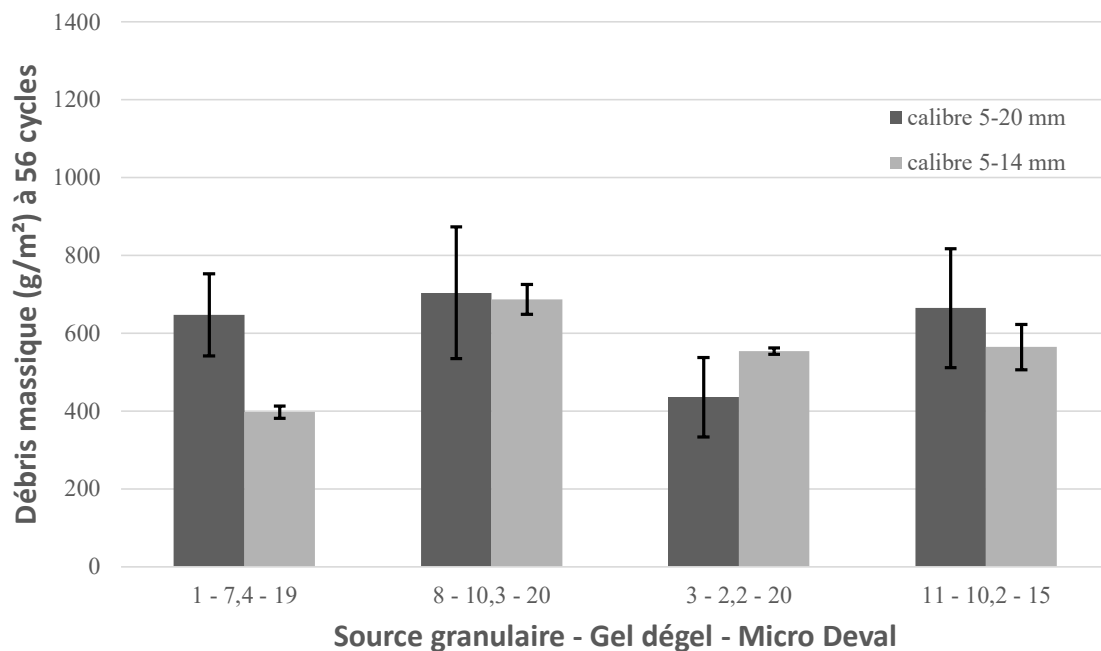


FIGURE 6.12 - Débris massique à 56 cycles en fonction de la source granulaire et du calibre utilisé

Les résultats de la figure 6.12 montrent qu'il n'y a pas de tendance nette entre la dimension maximale du gros granulat et la masse de débris après 56 cycles. En effet, pour les sources 1 et 11, une diminution des pertes à l'écaillage est obtenue avec le calibre 5 – 14 mm. Il n'y a pas d'influence pour la source 8, alors que pour la source 3, le calibre 5 – 14 mm engendre une augmentation de la masse des débris. Globalement, à partir de ces résultats, il n'est pas possible de conclure sur une influence quelconque du calibre du gros granulat sur la masse des débris lors de l'essai d'écaillage. Ce résultat semble logique car si le calibre du granulat est modifié, cela n'a pas d'impact direct sur la qualité de la pâte de ciment, principale source des débris dus à l'écaillage.

Les histogrammes des figures 6.13 et 6.14 montrent l'influence du calibre du gros granulat sur la surface dégarnie (figure 6.13) et sur la surface éclatée (figure 6.14) au niveau des plaques d'écaillage.

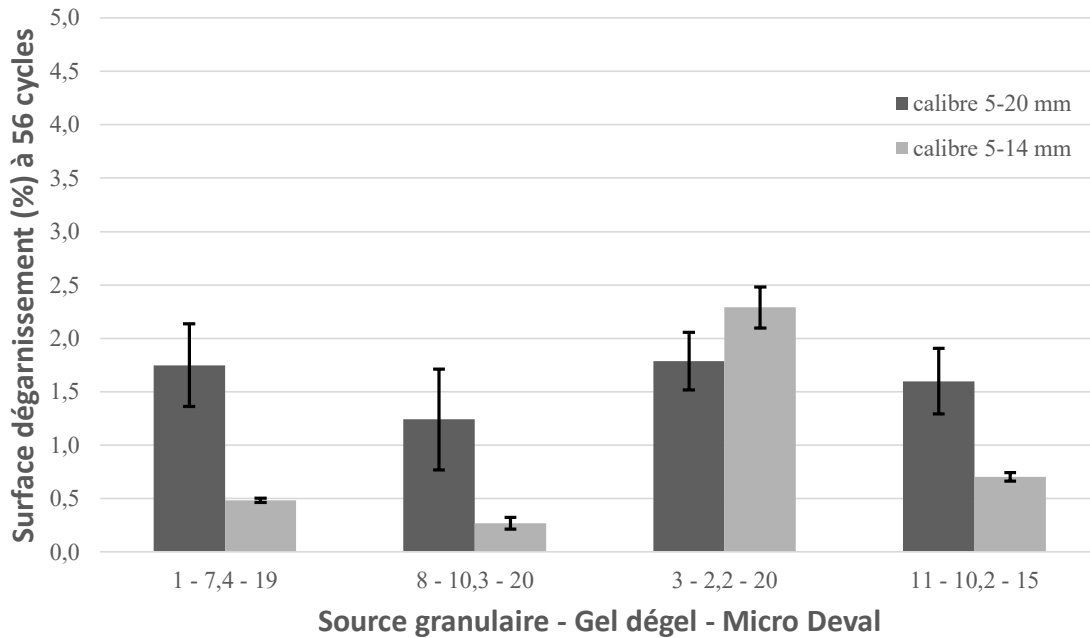


FIGURE 6.13 - Surface de dégarnissement à 56 cycles en fonction de la source granulaire et du calibre de granulat

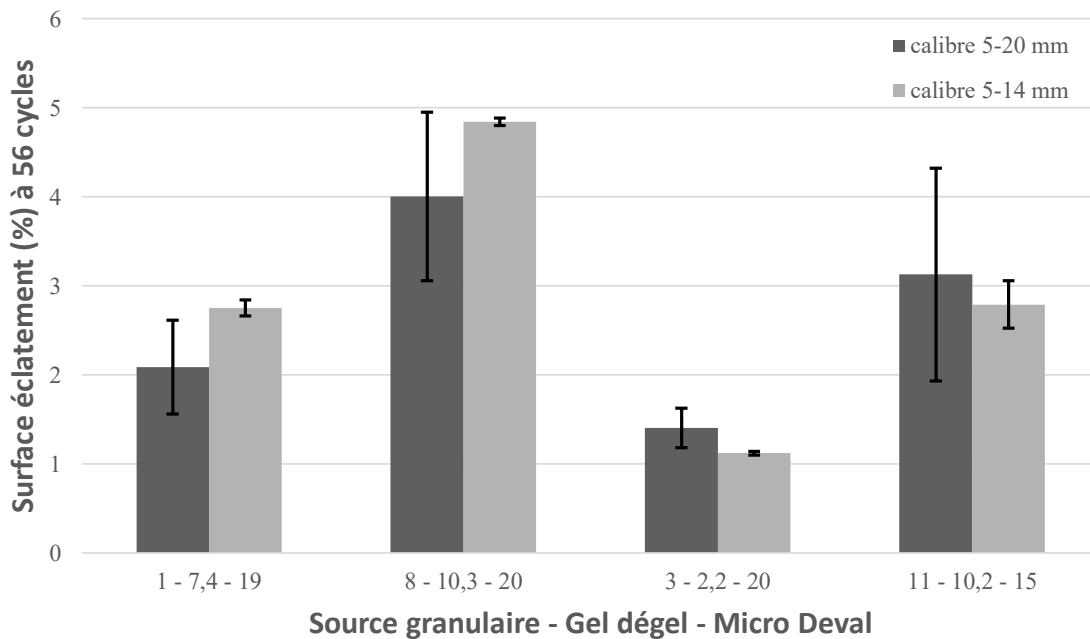


FIGURE 6.14 - Surface d'éclatement à 56 cycles en fonction de la source granulaire et du calibre de granulat

À l'exception de la source 3, les dégarnissements sont fortement diminués suite à la diminution de la dimension maximale du gros granulat (de 55 à 78 % de surface en moins). À l'inverse, dans le cas de la source 3, une augmentation de 28% des dégarnissements est observée pour le gros granulat de calibre 5-20 mm. Il est donc difficile de conclure sur une influence de la dimension maximale du granulat sur sa susceptibilité au dégarnissement. Globalement, les résultats suggèrent que diminuer le calibre du gros granulat permet de minimiser les risques de dégarnissement. Cependant, le cas particulier de la source 3 montre qu'il n'y a pas d'effet systématique. Le plus fort dégarnissement du calibre 5 – 14 mm de la source 3 pourrait résulter de la plus faible propreté de cette pierre. L'essai de particules fines passant le tamis de 80  $\mu\text{m}$  présente une valeur supérieure (2 %) à l'exigence de la norme CSA A23.1 de 1 %. Les poussières de concassage à la surface des particules pourraient contribuer à diminuer l'adhérence avec la pâte de ciment.

La figure 6.14 présente la surface d'éclatement en fonction de la source granulaire et du calibre du gros granulat. Compte tenu des barres de dispersion, il n'est pas possible de conclure sur une influence du calibre du gros granulat sur l'intensité de la surface des éclatements. En effet, pour les deux sources de catégories 1 (1 et 8), le calibre 5 – 14 mm produit une légère augmentation des éclatements. C'est l'effet inverse qui est constaté pour les deux sources de la catégorie 2 (3 et 11).

Globalement, il est difficile de tirer une conclusion claire sur l'effet du calibre du gros granulat sur l'intensité des dégarnissements et des éclatements. Néanmoins, les résultats suggèrent que l'utilisation d'un calibre granulaire plus petit (5 – 14 mm) pourrait contribuer à diminuer la susceptibilité au dégarnissement de certains granulats (sources 1, 8 et 11). Dans le cas des éclatements, la diminution du calibre ne semble pas avoir d'effet évident.

## **6.5 INFLUENCE DE LA QUALITÉ DE LA MATRICE CIMENTAIRE**

Cette partie a pour but de mieux comprendre l'influence de la qualité de la matrice cimentaire sur la durabilité à l'écaillage et la susceptibilité des granulats à éclater ou/et dégarnir. Ce paragraphe regroupe les résultats des travaux réalisés lors des phases 1, 3 et 4 pour les bétons produits avec les granulats provenant des sources 1 et 8 (matrice type XIII – phase 3, matrice V-S – phase 1 et matrice F2 – phase 4).

La figure 6.15 illustre l'influence du type de matrice cimentaire et de la source granulaire sur la masse des débris après 56 cycles d'essai d'écaillage.

Les résultats montrent un fort impact de la matrice cimentaire sur la durabilité à l'écaillage. En effet, que ce soit pour la source 1 ou la source 8, une matrice de qualité supérieure (type XIII) permet de diminuer les débris massiques en dessous de la limite maximale de 500 g/m<sup>2</sup>. À l'inverse, l'utilisation d'une matrice cimentaire de qualité inférieure (type F2) engendre la plus forte masse de débris (jusque 1200 g/m<sup>2</sup>). Par rapport à la matrice de type V-S, la matrice de type XIII a permis de diminuer de moitié les débris, alors que la matrice de type F2 les a augmentés de 72 %. Ces résultats étaient prévisibles puisqu'il est bien démontré que la durabilité à l'écaillage des bétons à haute performance (type XIII) est nettement meilleure que celle d'un béton conventionnel. Dans le cas de la matrice F2, la durabilité à l'écaillage est très faible car ce type de béton n'est pas conçu pour une exposition sévère aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déglacage.

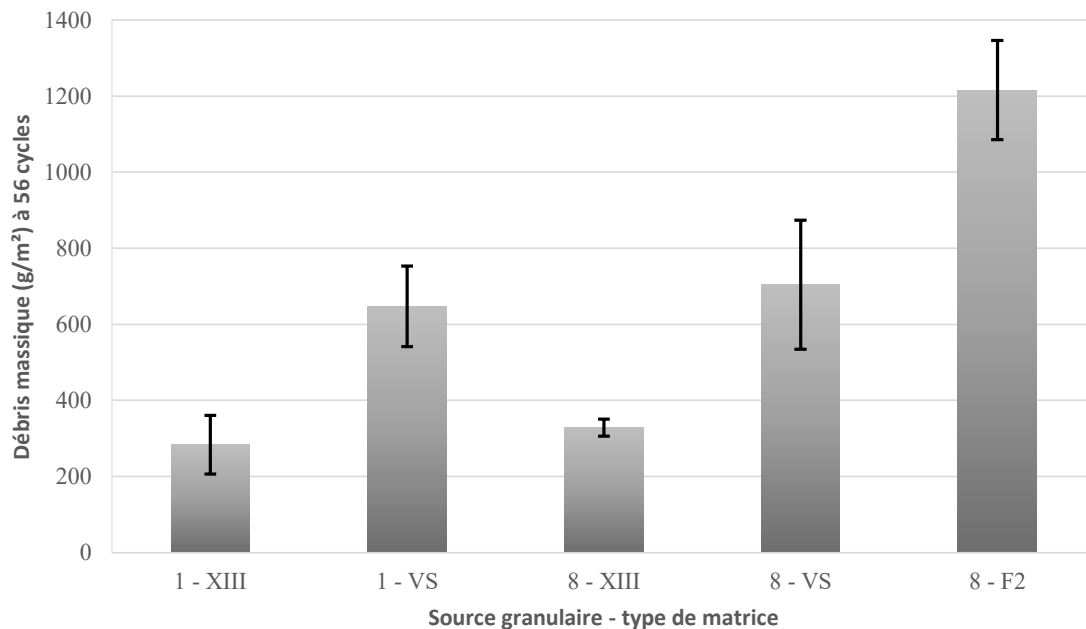


FIGURE 6.15 - Débris massique à 56 cycles en fonction de la source granulaire et de la matrice cimentaire

Les figure 6.16 et 6.17 présentent l'influence du type de matrice cimentaire et de la source granulaire sur l'intensité des dégarnissements (figure 6.16) et des éclatements (figure 6.17).



Il faut rappeler que les sources granulaires 1 et 8 font partie de la catégorie des sources moins performantes.

Les résultats de la figure 6.16 démontrent qu'une matrice haute performance (type XIII), améliore nettement la performance au dégarnissement des gros granulats dans la catégorie la moins performante (sources 1 et 8). Cette matrice, plus adhérente et plus imperméable, peut offrir une meilleure protection contre la saturation et la pénétration des ions chlorés dans la porosité des particules de gros granulats. À l'inverse, la protection de la matrice F2, très perméable, est nettement moins efficace que celle de la matrice intermédiaire de type V-S.

Les résultats de la figure 6.17 montrent qu'une matrice à haute performance (type XIII) a aussi un effet favorable sur la susceptibilité à l'éclatement de matériaux granulaires de plus faible performance (1 et 8). L'effet est cependant moins net que dans le cas des dégarnissements. La matrice F2 tend pour sa part à produire plus d'éclatements que ceux produits avec la matrice intermédiaire (V-S) mais cette dernière a présenté une valeur similaire à celles de la matrice F2. Il en est donc plus difficile d'affirmer que la matrice F2 est pire que la matrice V-S dans le cas des éclatements.

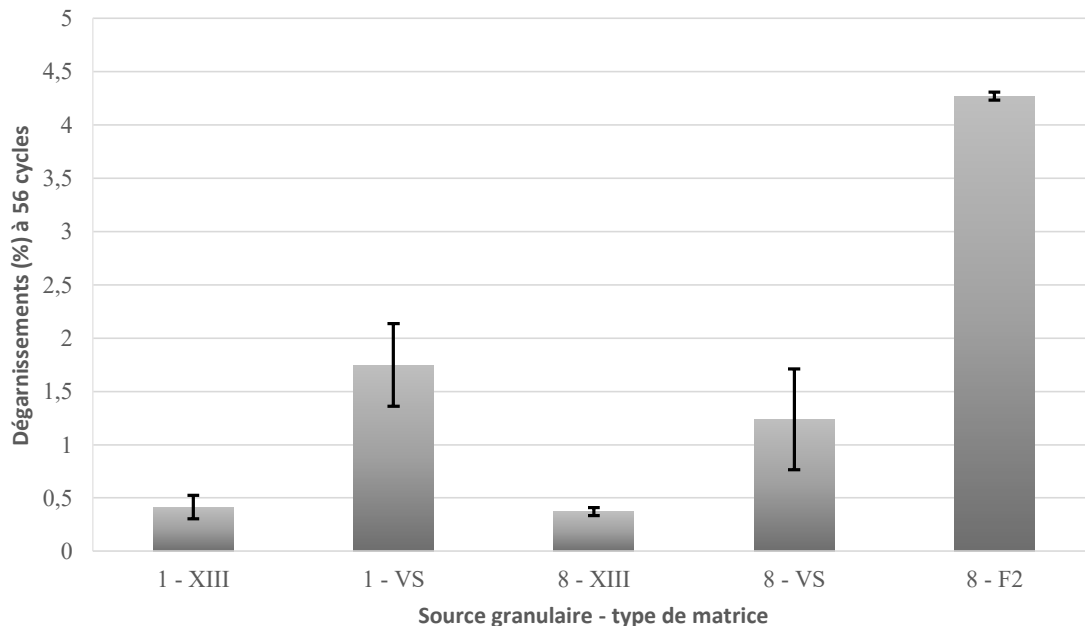


FIGURE 6.16 - Surface de dégarnissements en fonction de la source granulaire et du type de matrice cimentaire

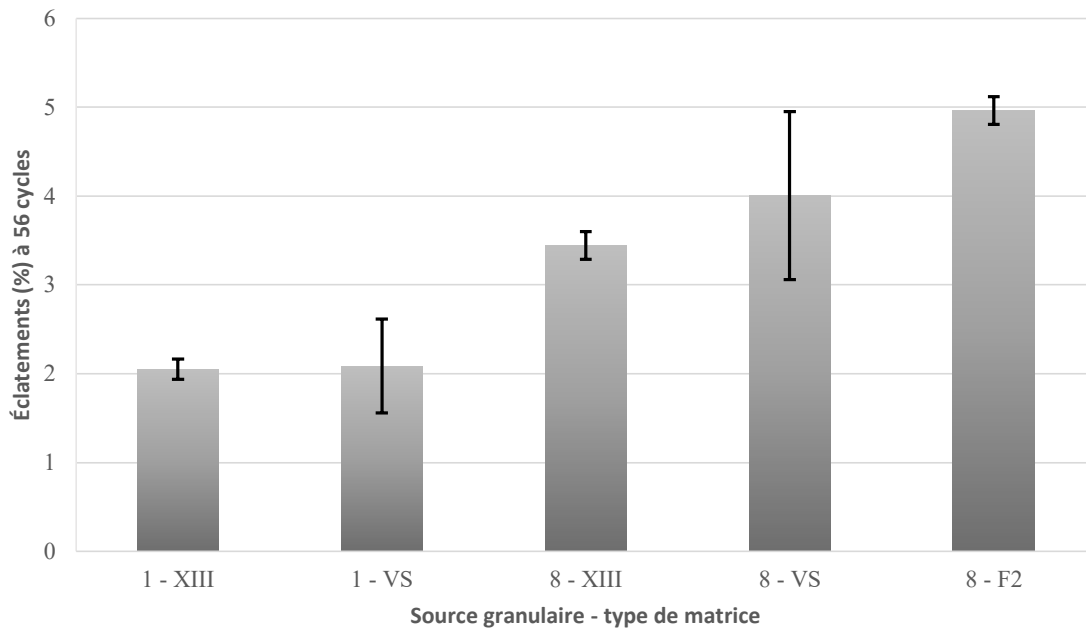


FIGURE 6.17 - Surface d'éclatements en fonction de la source granulaire et du type de matrice cimentaire

Le plus faible effet de la matrice sur les éclatements semble logique. Les granulats qui éclatent sont d'abord dégarnis. En l'absence de la protection de la pâte de ciment qui recouvrait la particule, l'éclatement se produira, et ce indépendamment de la qualité de la matrice.

Globalement, ces résultats tendent à montrer que la durabilité à l'écaillage de matériaux granulaires possédant une plus forte susceptibilité au dégarnissement et à l'éclatement (sources 1 et 8) peut être influencée par la qualité de la matrice cimentaire qui les contient. Une matrice cimentaire plus performante diminue nettement les dégarnissements mais a peu d'effet favorable sur les éclatements. À l'inverse, une matrice cimentaire peu performante augmente fortement les dégarnissements mais a relativement peu d'effet sur les éclatements.

Pour conclure, une matrice améliore grandement la durabilité du béton à l'écaillage et les granulats à dégarnir, mais ce n'est pas suffisant pour les empêcher d'éclater. Il faut donc utiliser des granulats présentant une bonne résistance à l'éclatement.

## 6.6 INFLUENCE DE LA QUALITÉ DU $\bar{L}$

Cette partie de l'analyse vise à mieux comprendre l'influence du  $\bar{L}$  sur la durabilité à l'écaillage et la susceptibilité à dégarnir et éclater des granulats. L'analyse porte sur les résultats d'essais réalisés sur un béton de la phase 1 et sur les deux bétons de la phase 5. Tous ces bétons ont été produits avec la source 11. Le béton de la phase 1 possède un facteur d'espacement de 96  $\mu\text{m}$  (figure 6.18). Les deux bétons de la phase 5 ont des facteurs d'espacements plus élevés de 173 et 224  $\mu\text{m}$ . Dans tous les cas, le facteur d'espacement de ces bétons est toujours conforme à l'exigence de la norme CSA A23.1 (inférieur à 230  $\mu\text{m}$ ). Au départ, il était prévu d'avoir un facteur d'espacement dans la plage 250 – 350  $\mu\text{m}$  et un facteur d'espacement supérieur à 350  $\mu\text{m}$ .

La figure 6.18 montre une légère réduction dans les pertes massiques avec la diminution du  $\bar{L}$ . Cependant, il est à noter que les masses de débris sont toutes supérieures à la limite de 500  $\text{g}/\text{m}^2$  malgré la protection de facteurs d'espacements conformes à l'exigence de la norme (inférieur à 230  $\mu\text{m}$ ).

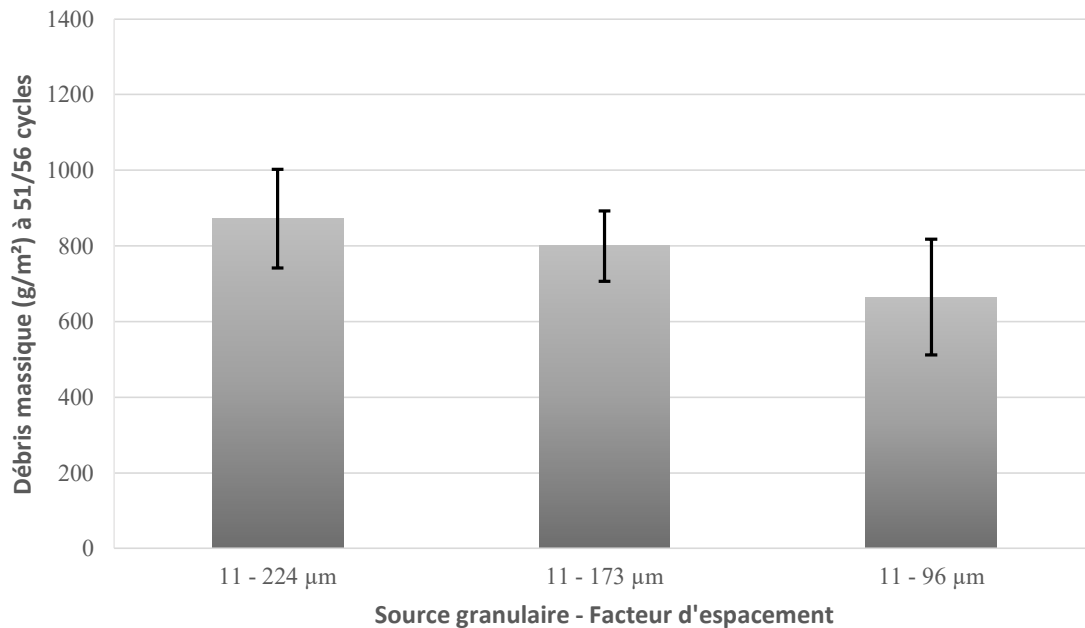


FIGURE 6.18 - Débris massique à 56 cycles en fonction du facteur d'espacement

L'analyse optique des éclatements et dégarnissements a permis de produire les graphiques présentés aux figures 5.21 et 5.22. La source 11 est dans la catégorie intermédiaire avec

une perte au gel-dégel non confiné élevée de 10,2 %. Elle produit donc une quantité appréciable de dégarnissements (environ 1,5 %) et d'éclatements (environ 3 %). Les résultats de la figure 5.21 montrent que le facteur d'espacement, lorsqu'il est conforme à la norme, n'a pas d'influence sur l'intensité des éclatements. Il n'est malheureusement pas possible de déterminer si un facteur d'espacement plus élevé (350  $\mu\text{m}$ ) pourrait avoir un effet défavorable.

Les résultats présentés à la figure 5.22 suggèrent qu'un facteur d'espacement très faible (96  $\mu\text{m}$ ) augmente la susceptibilité au dégarnissement. Il faut cependant noter qu'un dégarnissement de 1,5 % se situe dans le niveau de sévérité moyen.

Le réseau de bulles d'air protège la pâte de ciment et non pas le granulat. Néanmoins, il n'est pas suffisant ici avec ce liant ternaire et cette formulation de béton utilisée. Il était donc prévisible qu'il n'y ait pas de relation claire entre le facteur d'espacement et l'intensité des dégarnissements et des éclatements. Pour expliquer les dégarnissements plus élevés obtenus avec le facteur d'espacement de 96  $\mu\text{m}$ , l'hypothèse d'une trop grande quantité de bulles d'air dans le béton (9,8 %) et dans la pâte est envisagée. Cela pourrait fragiliser la fine couche de pâte qui recouvre les particules de gros granulats proches de la surface. Cette fine couche plus fragile pourrait plus facilement être arrachée lors de l'essai d'écaillage.

## **6.7 INFLUENCE DE L'UTILISATION D'UN GÉOTEXTILE**

Cette partie de l'analyse vise à mieux comprendre l'influence du géotextile en fond de moule sur la durabilité à l'écaillage des bétons. Deux bétons ont été produits avec un liant de type GU et avec la source granulaire de très bonne qualité utilisée au laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke. Pour chaque gâchée, deux paires de plaques d'écaillage ont été coulées, une avec un géotextile au fond du moule, l'autre sans géotextile. Ce dernier a été retiré pendant la cure sèche avant la mise en pré-saturation.

Les deux bétons ont un facteur d'espacement de 156  $\mu\text{m}$  et 191  $\mu\text{m}$  respectivement. Au départ, des facteurs d'espacement inférieur à 230  $\mu\text{m}$  et compris entre 300 et 350  $\mu\text{m}$  étaient visés, de manière à mieux comprendre l'influence possible du facteur d'espacement.

La figure 6.19 présente la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel en fonction du facteur d'espacement et de la présence d'un géotextile (GTX). Toutes les masses de débris sont inférieures à la limite maximale de 500 g/m<sup>2</sup>. Ces résultats confirment que le liant GU, utilisé pour les bétons de cette phase, est plus durable à l'écaillage que le liant ternaire utilisé pour certaines des autres phases (notamment la phase 1).

Logiquement, les masses de débris obtenues avec le facteur d'espacement de 156 µm sont plus faibles que celles obtenues avec le facteur d'espacement de 191 µm. Il est également constaté que dans la plage de  $\bar{L}$  testée, il n'est pas possible de conclure sur l'effet du géotextile sur la durabilité. Dans un cas, le géotextile a légèrement amélioré la durabilité et dans l'autre il a légèrement diminué la durabilité.

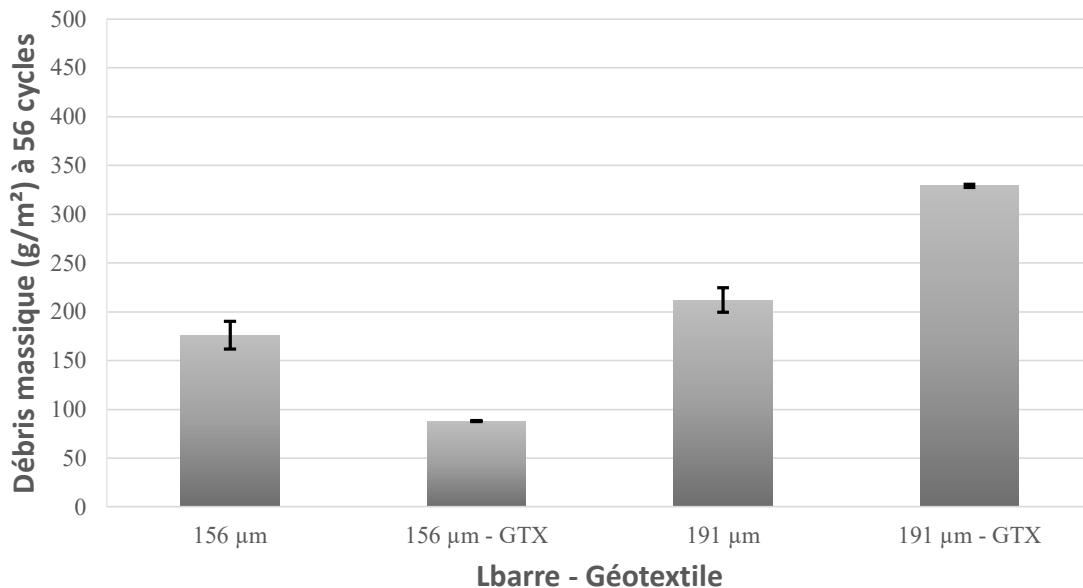


FIGURE 6.19 - Débris massique à 56 cycles en fonction du facteur d'espacement et du géotextile (GTX)

Les figures 5.24 et 5.25 présentent l'influence du facteur d'espacement et du géotextile sur l'intensité des dégarnissements et des éclatements. Les surfaces éclatées sont toutes très faibles (inférieures à 1,1 %) de même que les surfaces dégarnies (inférieures à 0,5 %). Ces très faibles valeurs découlent de l'utilisation d'un gros granulat de grande qualité (perte Micro Deval de 7,0 % et perte au gel-dégel non confiné de 5,0 %) combinée à une matrice de classe d'exposition C2 ayant démontré une très bonne durabilité à l'écaillage. Ces résultats confirment que la présence ou l'absence de géotextile n'a aucune influence



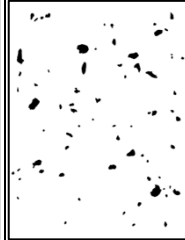
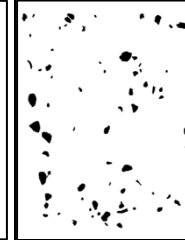
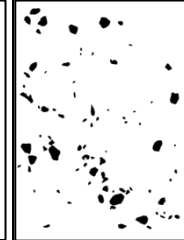










notable sur l'intensité des dégarnissements ou des éclatements, mais également que la matrice a un rôle important.

Globalement, il est possible de conclure qu'il n'y a pas d'intérêt à utiliser un géotextile pour l'essai d'écaillage dans ce cas-ci. De plus, l'utilisation de géotextile augmente les coûts des matériaux et de main d'œuvre lors de la mise en place et pour l'enlèvement de ce géotextile avant le début de l'essai.

## **6.8 SUIVI PHOTOGRAPHIQUE DE L'ÉTAT DE SURFACE DES PLAQUES D'ÉCAILLAGE**

Grâce à un suivi photos des plaques d'écaillages, il a été possible de produire un tableau comparatif permettant de mettre en évidence l'état de surface des plaques à différentes périodes et avec différentes sources de granulats. Ceci permet de relier le pourcentage de surface dégarnie et éclatée à un aspect visuel de l'état de surface des plaques à la fin de l'essai d'écaillage (tableau 6.2).

**TABLEAU 6.2 - Tableau comparatif des scans et photos des plaques d'écaillages**

Intervalle de la surface	0-1 %	1-2 %	2-3 %	3-4 %	4-5 %
Identification	C2 – 230 µm	VS-14 ; 5-20 mm	VS-11 ; 5-14 mm	XIII-8	VS-8 ; 5-14 mm
Éclatement (%)					
	0,59	1,5	2,5	3,6	4,3
Éclatement et dégarnissement (%)					
	0,87	2,5	3,2	4,0	4,6
Aspect visuel					

L'examen du tableau 6.2 suggère que pour des valeurs de surface éclatée de moins de 2 %, la plaque ne présente que peu de « taches noires » caractéristiques des éclatements des granulats de type calcaire ou dolomie. Pour ce niveau d'endommagement, les qualités esthétiques de la surface ne semblent pas significativement compromises. De plus, il est à noter que les dégarnissements ne sont souvent que peu visibles, même en nombre et en surface importante. Ce sont surtout les éclatements des granulats qui impactent les plus la qualité esthétique dû à l'apparition de ces « taches noires ». À noter que les exemples présentés dans le tableau 6.2 ne sont que préliminaires. Le choix des images a été fait pour présenter de manière claire les contrastes et non pour démontrer un effet des sources granulaires. Pour d'autres types de pierre, granite ou basalte par exemple, il peut y avoir moins de contraste entre les éclatements et la matrice comme le montre les images de l'annexe 3.

Ce type de tableau permettrait de fixer un pourcentage maximal de surface endommagées suite à l'écaillage. Mais la définition de ce pourcentage demeure un processus subjectif. La définition éventuelle d'une valeur limite devra faire l'objet d'un consensus découlant probablement d'une consultation générale parmi tous les intervenants associés à la durabilité des bétons.



## Chapitre 7 : CONCLUSIONS

Ce projet a permis de mieux comprendre la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec des sources granulaires disponibles au Québec. Les résultats ont notamment permis de mettre en lumière l'influence de différents paramètres sur l'écaillage ou bien sur la susceptibilité à produire des « pop-out » des granulats : la résistance au gel-dégel non confiné, la résistance à l'abrasion à l'essai Micro Deval, la qualité de la matrice cimentaire, la qualité du réseau d'air et la présence d'un géotextile à la production du béton.

Cette recherche a montré dans un premier temps qu'il est difficile de relier la perte massique à l'essai d'écaillage et les propriétés intrinsèques des granulats comme les résistances au gel-dégel non confiné et à l'abrasion à l'essai Micro Deval. Une méthode d'analyse a été développée pour quantifier les « pop-out » et les dégarnissements des granulats et ainsi mieux comprendre leur rôle dans l'écaillage et relier ces résultats aux caractéristiques spécifiques des granulats. Cela a permis de faire un premier pas vers une méthode permettant de définir la susceptibilité d'un granulat à éclater en fonction de ses caractéristiques. Il a ainsi pu être établi une première classification en fonction de ces paramètres. Cette classification s'est révélée pertinente en termes de « pop-out » mais peut être plus délicate en ne considérant que les résultats à l'essai d'écaillage. Un granulat ayant une résistance au gel-dégel non confiné supérieure au 9 % requis par la norme (CSA A23.1 tableau 12 dans le cas des pierres des Basses-Terres du Saint-Laurent) peut présenter jusqu'à 4,0 % de surface éclatée après 56 cycles de gel-dégel. Pour le granulat présentant des pertes au Micro Deval supérieures à 19 % (limite maximale de la norme CSA A23.1 tableau 12 dans le cas des pierres des Basses-Terres du Saint-Laurent), la surface dégarnie peut atteindre une valeur de 1,9 %. En prenant en compte la somme des résultats à ces deux essais, certains granulats ont atteint une valeur dépassant les 23 % associée à une valeur de surface dégarnie et éclatée supérieure à 3,6 %. Cette dernière correspond à une surface plutôt endommagée comme le montre l'exemple du tableau 6.2. De plus, les fragments des granulats peuvent représenter jusqu'à 18,8 % de la masse des débris mesurés par l'essai d'écaillage, il est donc important de prendre en compte la qualité du granulat pour protéger le béton de l'écaillage.

Ces résultats montrent qu'il est possible de mieux prévoir le comportement des granulats à partir de certaines de leurs caractéristiques intrinsèques. Cela est très bénéfique pour le contrôle des matériaux granulaires utilisés dans les éléments de bétons exposés à des conditions sévères car cela permet de qualifier un granulat sans devoir réaliser un essai d'écaillage qui est très onéreux en coût et en temps en comparaison aux essais de gel-dégel non confiné et Micro Deval.

Ce projet a également pu mettre en évidence l'intérêt d'une bonne matrice pour protéger un béton contre le phénomène d'écaillage. Avec une matrice de type des pertes massiques de 328 g/m<sup>2</sup> contre 704 g/m<sup>2</sup> ont été obtenues avec la matrice VS et 1216 g/m<sup>2</sup> pour la matrice de type F2 pour le granulat provenant de la source 8. Cela indique que le choix de la matrice est un paramètre très important lors de la formulation pour éliminer ou à du moins fortement réduire les dégradations de l'écaillage. Les résultats ont montré qu'une matrice de qualité supérieure permet de protéger les granulats en renforçant la zone de transition et donc diminuer les dégarnissements d'un granulat ayant une faible résistance à l'abrasion, mais elle n'est pas suffisante pour empêcher un granulat de produire des « pop-out ». En effet, un granulat sensible aux cycles de gel-dégel va éclater dès qu'il ne sera plus protégé par la matrice, et peut-être même éclaté en raison des pressions internes dues au gel et ce, même s'il n'a pas encore commencé à dégarnir. Néanmoins, cette dernière hypothèse n'a pas été vérifiée et pourrait faire l'objet de recherches plus approfondies.

Par la suite, l'étude a confirmé que la qualité du réseau d'air et notamment le facteur d'espacement permet de protéger le béton contre l'écaillage. En effet, malgré des pertes massiques très importantes (jusque 1000 g/m<sup>2</sup>) pour des  $\bar{L}$  faibles (224  $\mu$ m au plus grand), une réduction des pertes massiques a tout de même pu être observée pour des facteurs d'espacement plus faibles. Néanmoins, ce facteur ne permet de protéger que la pâte de ciment et le mortier dans son prolongement. Ainsi, même si le béton ne subira que peu les effets du gel-dégel, le comportement des granulats n'est que peu affectés par le réseau d'air. Par conséquent, un réseau d'air de bonne qualité ne suffit pas à protéger le béton à l'endommagement. Un granulat devra présenter de bonnes caractéristiques pour éviter cet endommagement, en plus d'un réseau d'air de qualité.

Enfin, la recherche avait pour but de vérifier l'intérêt de l'utilisation d'un géotextile pour l'essai accéléré en laboratoire afin de simuler l'absorption du substrat lors de la mise en place du béton. Les résultats n'ont pas montré d'effet bénéfiques ou nuisibles clairs associés à l'utilisation de géotextile : toutes les plaques avec géotextile étaient en dessous des 500 g/m<sup>2</sup> requis par la norme BNQ 2621-905 Annexe B. Ainsi, même si le géotextile est un bon moyen de mettre en présence un corps absorbant pour simuler le substrat, le temps et l'énergie requise pour ne pas constater d'amélioration à l'essai d'écaillage ne favorise pas de garder cet élément pour la suite.

Les travaux et les expérimentations de cette recherche ont permis de soulever de nouvelles questions sur lesquelles il serait intéressant de se pencher :

- Expliquer l'apparition d'éclatement des granulats même en présence d'une bonne matrice ;
- Définir l'épaisseur de pâte nécessaire pour protéger un grnat sensible à l'éclatement ;
- Mesurer la quantité de particules de granulats proches de la surface qui sont susceptibles de dégarnir et/ou éclater, et la comparer aux valeurs mesurées à la fin des cycles de gel-dégel ;
- Vérifier l'influence de la propreté du grnat sur sa susceptibilité à dégarnir ;
- Appliquer la méthode optique établie sur des cas en conditions réelles et établir une corrélation avec les résultats de laboratoire.

## Chapitre 8 : REFERENCES

- [1] R. Gagné and L. Linger, “La durabilité des bétons : bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement,” Presses de l’école nationale des ponts et chaussées, 2008.
- [2] R. Gagné, « Notes de cours GCI-714 : Durabilité et réparation du béton - Aut. 2018 », Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 2018.
- [3] T. C. Powers, “The air requirement of frost resistant concrete,” Highw. Res. Board, vol. 29, p. 184–211, 1949.
- [4] M. Pigeon and R. Pleau, « Durability of concrete in cold climates », dans *Modern concrete technology* 4, London: E & FN Spon, 1995.
- [5] R. Defay, I. Prigogine, A. Bellemans et D.H. Everett, « Surface tension and absorption », Longmans ed., London, 1966, p. 243-255.
- [6] G. Fagerlund, « Studies of the destruction mechanisms at freezing of porous materials », dans *Proceeding of the sixth international congress on the problems raised by frost action*, Le Havre, France, Fondation française d'études nordiques, p. 166-196, 1975.
- [7] P.E. Petersson, « Scaling résistance tests of concretes - experience from practical use in Sweden », dans *Comptes rendus de l'Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants*, Comité RILEM TC 117, Québec, Canada, p. 249-259, 1993.
- [8] C. Foy, M. Pigeon et N. Banthia, « Freeze-thaw durability and deicer salt scaling resistance of a 0.25 water-cement ratio concrete », dans *Cement and Concrete Research*, vol. 18, n° 4, p. 604-614, 1988.
- [9] A. Bilodeau, G.G. Carette, V.M. Malhotra, W.S. Langley, « Influence of curing and drying on salt scaling resistance of fly ash concrete », dans *Second CANMET/ACI*

- International Conference on Durability of Concrete, ACI SP-126, V. M. Malhotra éd., p. 210-228, 1991.
- [10] D. Whiting, « Durability of high-strength concrete », dans Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p. 169-183, 1987.
  - [11] R.S. Barrow, K.M. Hadchiti, P.M. Carrasquillo, R.L. Carrasquillo, « Temperature rise and durability of concrete containing fly ash », dans Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete, ACI SP-114, V.M. Malhotra éd., p. 331-347, 1989.
  - [12] P. Kleiger, S. Gebler, « Fly ash and concrete durability », dans Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p.1043-1069, 1987.
  - [13] C. Johnston, « Effects of microsilica and class C fly ash on resistance of concrete to rapid freezing and thawing and scaling in the presence of deicing agents », dans Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p.1183-1204, 1987.
  - [14] G. Fagerlund, « Effect of air-entraining and other admixtures on the salt-scaling resistance of concrete », dans Chalmers International Seminar on some Aspects of Admixture and Industrial By-Products on the Durability of Concrete, Göteborg, Suède, p. 33, 1986.
  - [15] J. Virtanen, « Field study on the effects of additions on the salt scaling resistance of concrete », dans Nordic Concrete Research, vol. 9, p. 197-212, 1990.
  - [16] I. K. Battaglia, J. F. Munoz, and S. M. Cramer, « Proposed Behavioral Model for Deicer Scaling Resistance of Slag Cement Concrete », dans J. Mater. Civ. Eng., vol. 22, no. 4, p. 361, 2010.
  - [17] « CSA A23.1 Béton : Constituants et exécution des travaux », dans CSA A23.1., CSA, 2014.

- [18] Amir N. Hanna, « Aggregate Tests for Portland Cement Concrete Pavements: Review and Recommendations », dans Research Results Digest, n°281, Sept. 2003.
- [19] P.-O. Morin-Morisette, « Étude de la durabilité à l'écaillage en présence de sel fondant des bétons avec liant ternaire », Dissertation, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 2016.
- [20] « CSA A23.2-29A Méthode d'essai pour déterminer la résistance à la dégradation du gros granulat par abrasion dans l'appareil micro-Deval », dans CSA A23.2., CSA, 2014.
- [21] S.A. Senior and C. A. Rogers, « Laboratory tests for predicting coarse aggregate performance in Ontario », dans Transportation Research report 1301, p. 97-106, 1991.
- [22] C. Rogers, B. Lane and S. Senior, « The Micro-Deval abrasion test for coarse and fine aggregate in asphalt pavement », dans Materials Engineering and Research Office Report 006, Ministry of Transportation of Ontario, 2003.
- [23] C.A. Rogers, M.L. Bailey and B. Price, « Micro-Deval test for evaluating the quality of fine aggregate for concrete and asphalt », dans Transportation Research report 1301, p. 68-76, 1991.
- [24] « CSA A23.2-24A Méthode d'essai de résistance au gel et au dégel du gros granulat non confiné », dans CSA A23.2., CSA, 2014.
- [25] C.A. Rogers, S.A Senior and D. Boothe, » Development of an unconfined freeze-thaw test for coarse aggregates », dans Report Engineering Materials 87, Ministry of Transportation of Ontario, 1989.
- [26] « CSA A23.2-22C Calcul de la résistance à l'écaillage des surfaces de béton exposées à des produits chimiques de déglacage utilisant la perte de masse », dans CSA A23.2., CSA, 2014.

- [27] « Béton prêt à l'emploi – Programme de certification », dans BNQ 2621-905, BNQ, p. 5, 2018.
- [28] C. Drolet, « Analyse pétrographique détaillée des gros granulats », MTQ, 2019.
- [29] ImageJ, sur <https://imagej.net/Welcome>, consulté le 03/09/2020 à 22 h 54.

# Chapitre 9 ANNEXES

## Annexe 1 - Macro de la surface totale



```
macro "surface_totale [m]" {

// Color Thresholder 1.52k
// Autogenerated macro, single images only!
min=newArray(3);
max=newArray(3);
filter=newArray(3);
a=getTitle();
run("RGB Stack");
run("Convert Stack to Images");
selectWindow("Red");
rename("0");
selectWindow("Green");
rename("1");
selectWindow("Blue");
rename("2");
min[0]=0;
max[0]=255;
filter[0]="pass";
min[1]=0;
max[1]=133;
filter[1]="pass";
min[2]=0;
max[2]=255;
filter[2]="pass";
for (i=0;i<3;i++){
    selectWindow(""+i);
    setThreshold(min[i], max[i]);
    run("Convert to Mask");
    if (filter[i]=="stop") run("Invert");
}
imageCalculator("AND create", "0","1");
imageCalculator("AND create", "Result of 0","2");
for (i=0;i<3;i++){
    selectWindow(""+i);
    close();
}
selectWindow("Result of 0");
close();
selectWindow("Result of Result of 0");
rename(a);
// Colour Thresholding-----
// modification fichier en B&W
run("8-bit");

//inversion B&W
//setAutoThreshold("Default");
//run("Threshold...");
//setThreshold(0, 128);
//setOption("BlackBackground", true);
//run("Convert to Mask");

// numération des dégarnissements
run("Analyze Particles...", "size=1330-300000 circularity=0.2-1.00 show=Masks display
clear summarize add");
}
```



## Annexe 2 - Macro de la surface des éclatements

```
macro "surface_eclatement [m]" {

// suppression du rouge

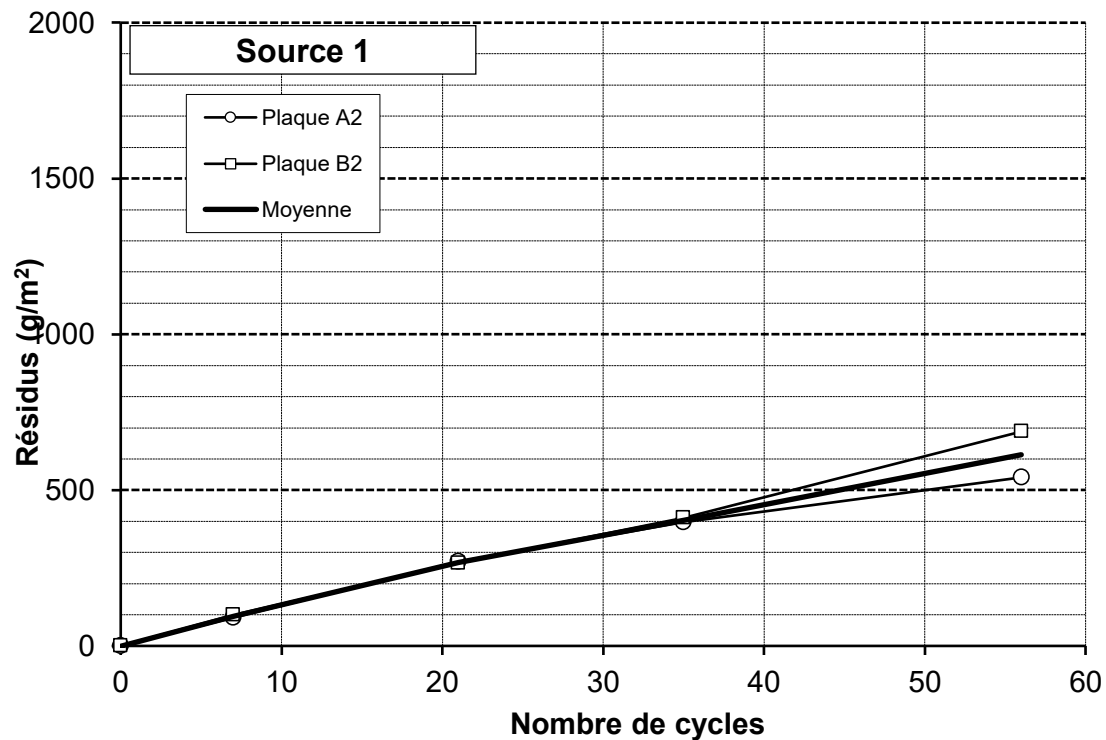
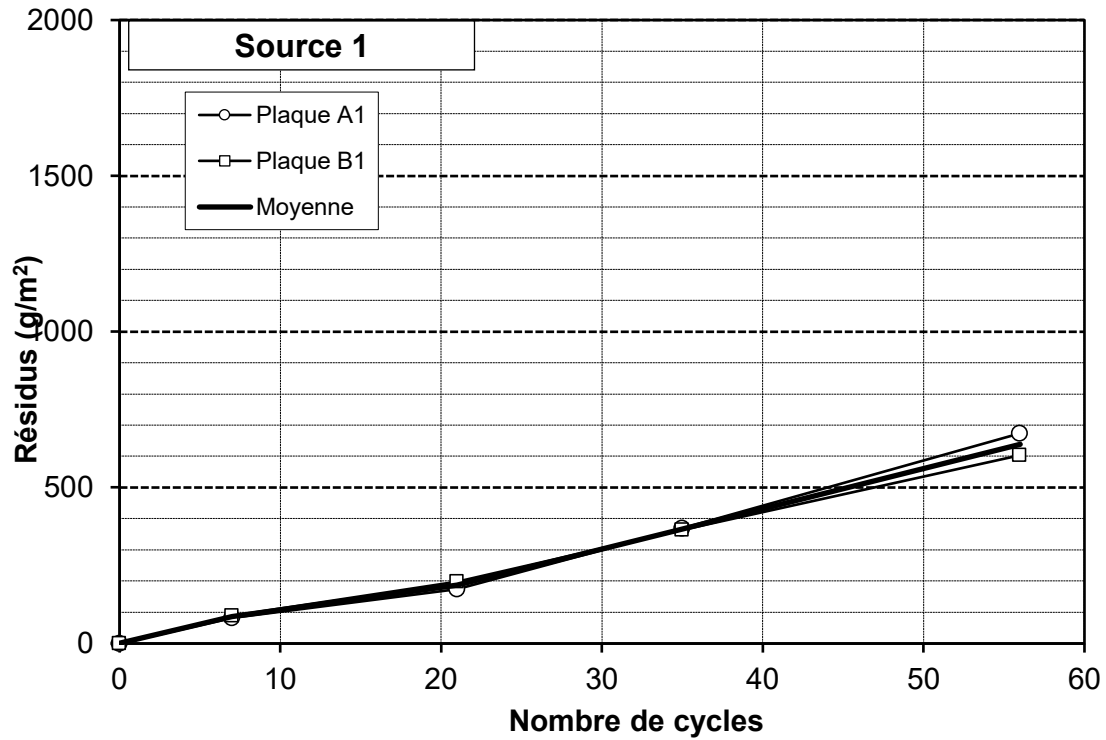
min=newArray(3);
max=newArray(3);
filter=newArray(3);
a=getTitle();
run("RGB Stack");
run("Convert Stack to Images");
selectWindow("Red");
rename("0");
selectWindow("Green");
rename("1");
selectWindow("Blue");
rename("2");
min[0]=0;
max[0]=155;
filter[0]="pass";
min[1]=0;
max[1]=151;
filter[1]="pass";
min[2]=0;
max[2]=152;
filter[2]="pass";
for (i=0;i<3;i++){
    selectWindow(""+i);
    setThreshold(min[i], max[i]);
    run("Convert to Mask");
    if (filter[i]=="stop") run("Invert");
}
imageCalculator("AND create", "0","1");
imageCalculator("AND create", "Result of 0","2");
for (i=0;i<3;i++){
    selectWindow(""+i);
    close();
}
selectWindow("Result of 0");
close();
selectWindow("Result of Result of 0");
rename(a);

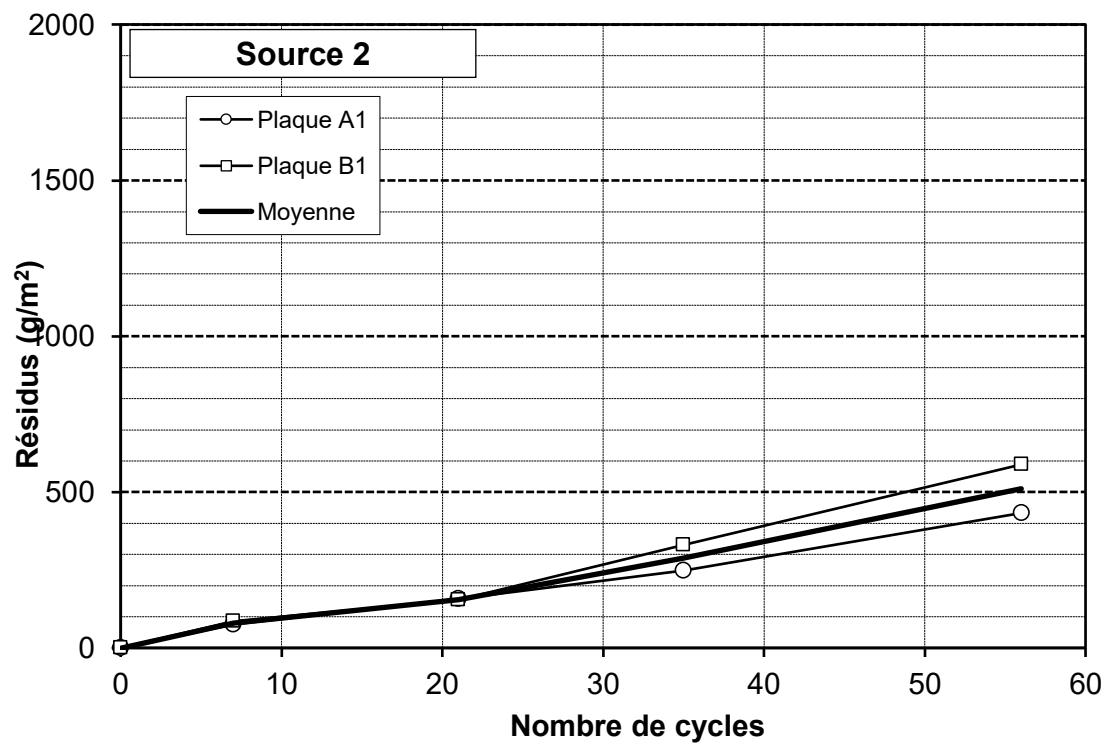
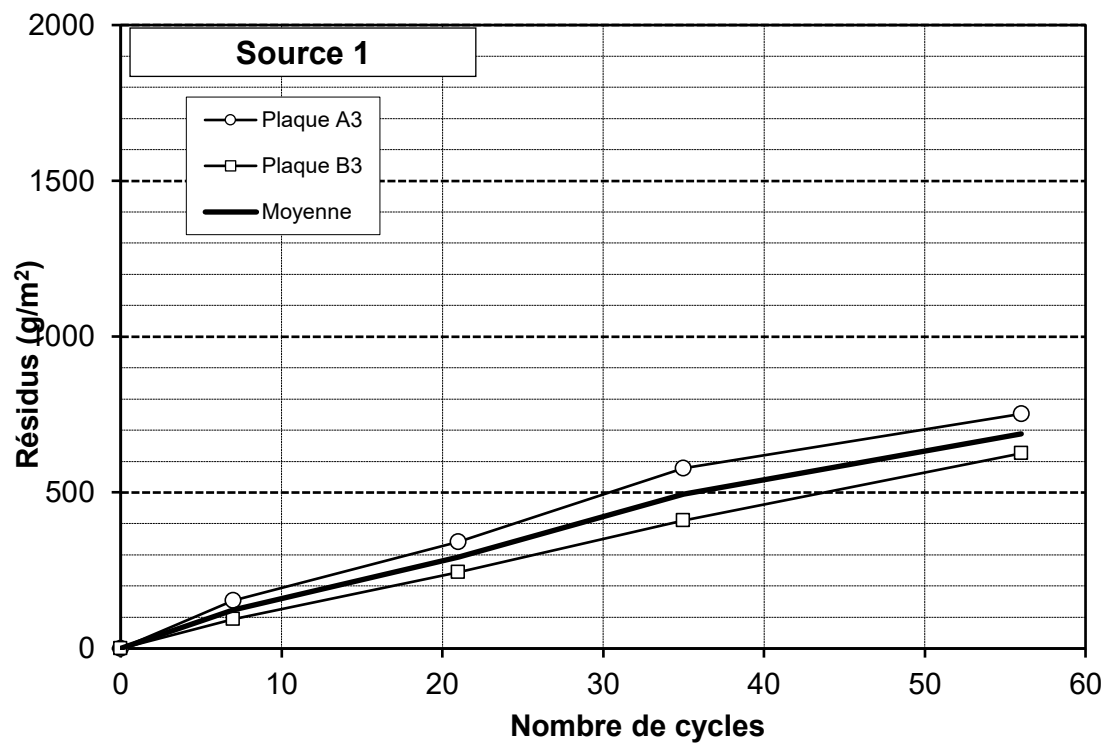
// modification fichier en B&W
run("8-bit");

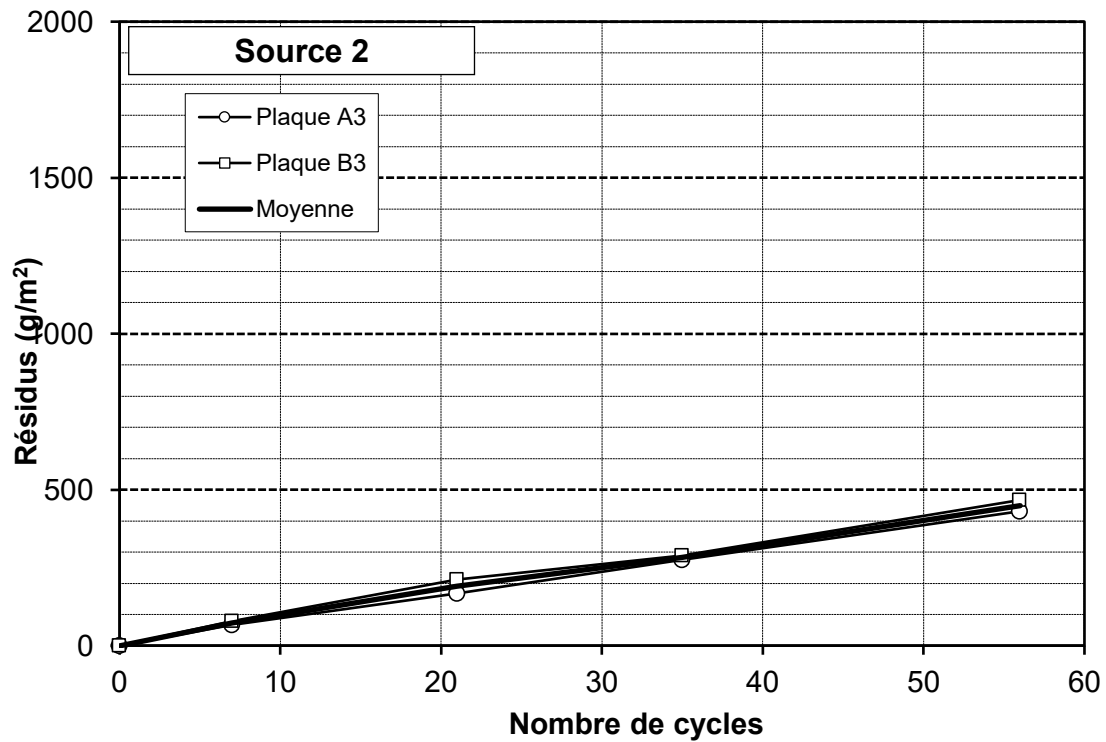
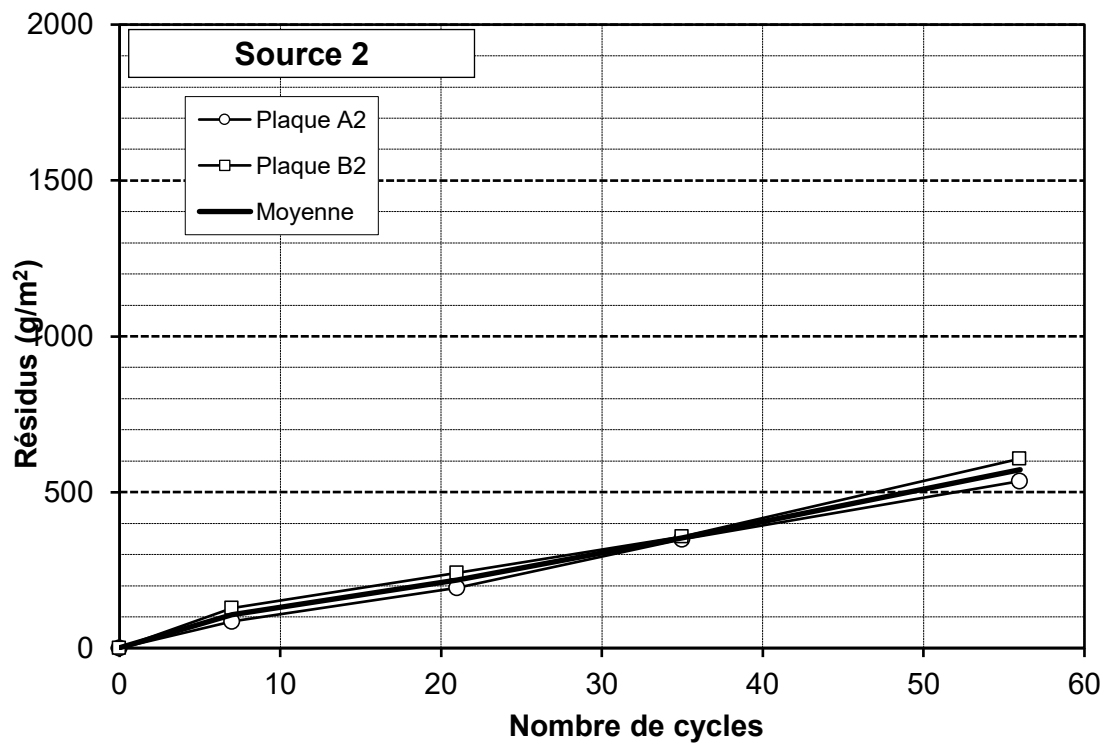
// numération des éclatements
run("Analyze Particles...", "size=1330-300000 circularity=0.2-1.00 show=Masks display
clear summarize add");

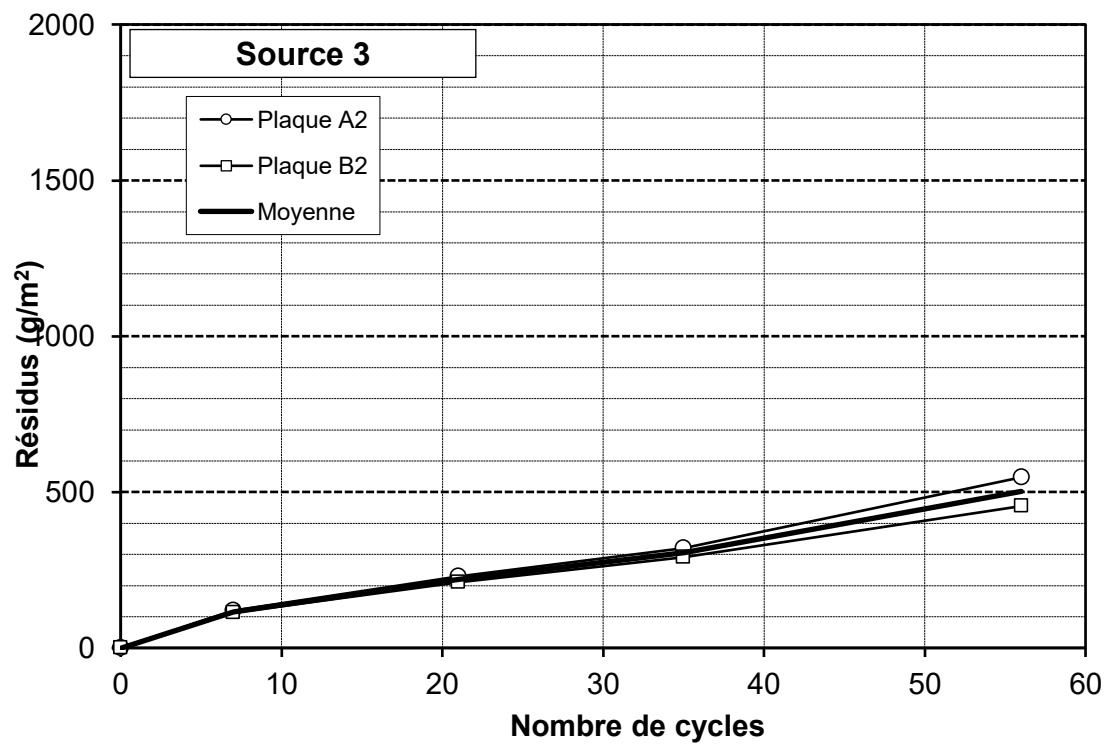
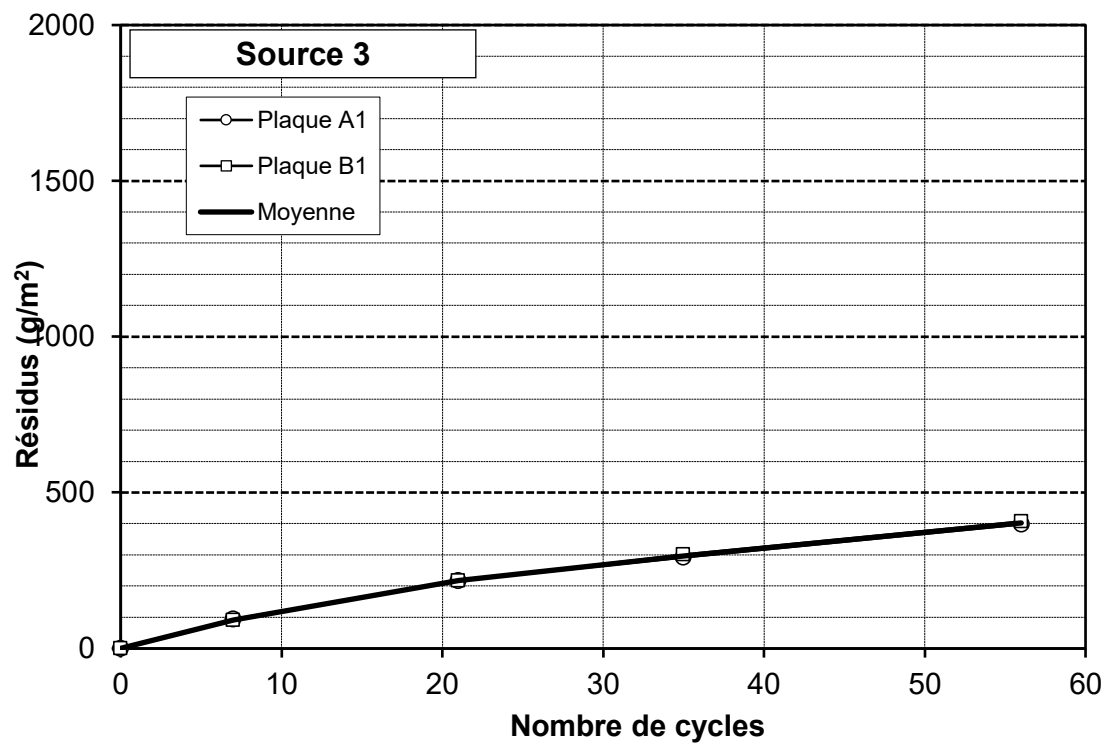
}
```

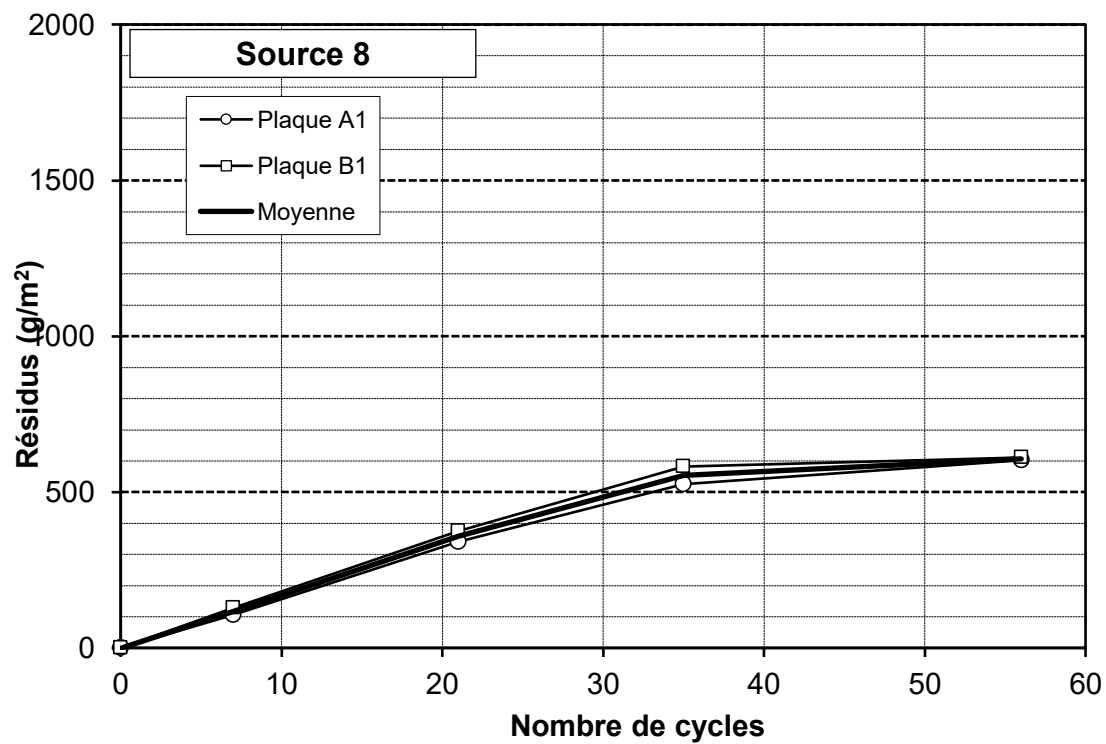
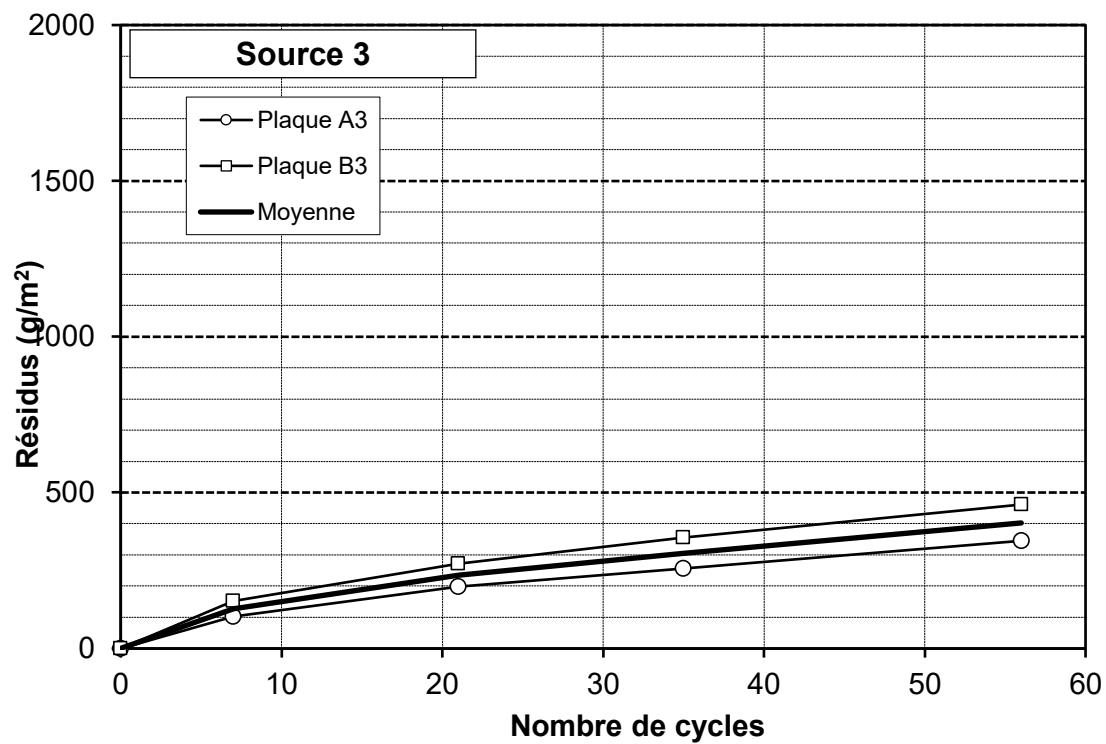
**Annexe 3 - Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 1  
/ État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 1**

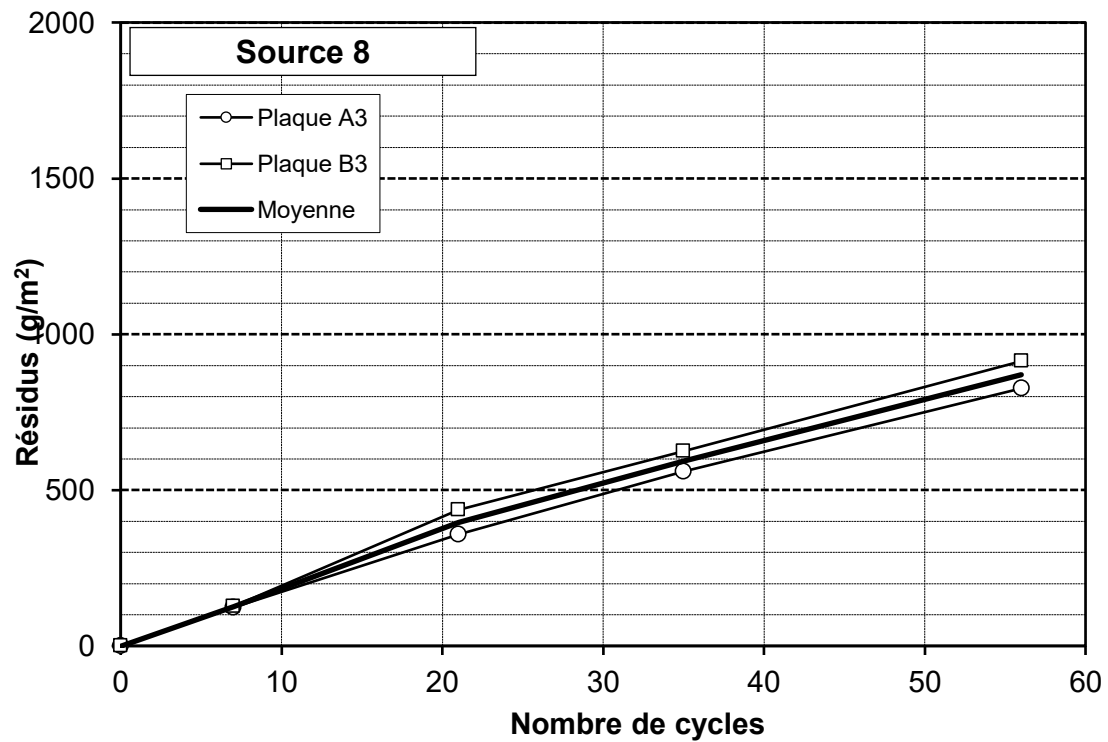
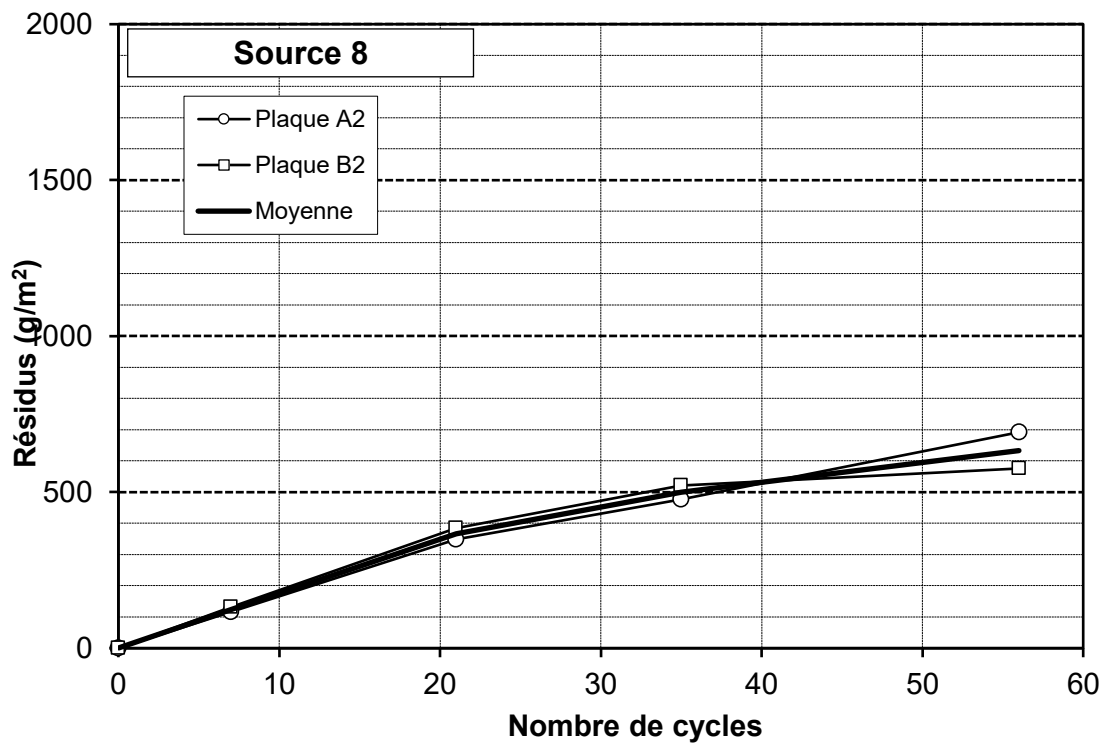


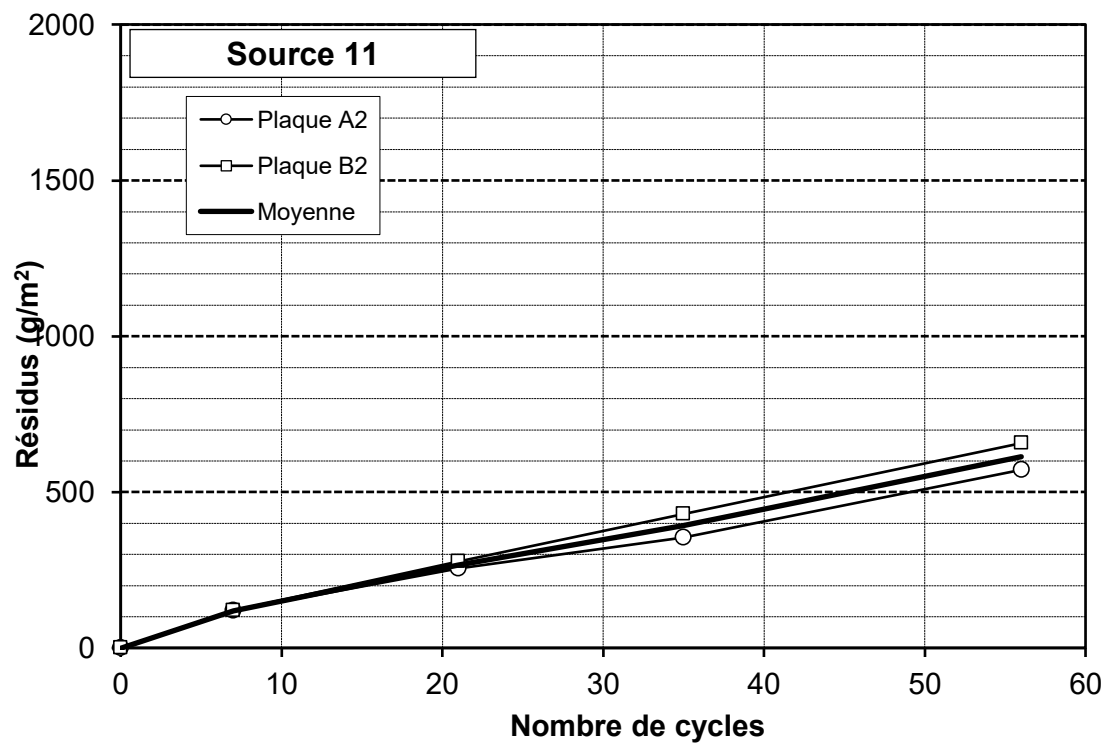
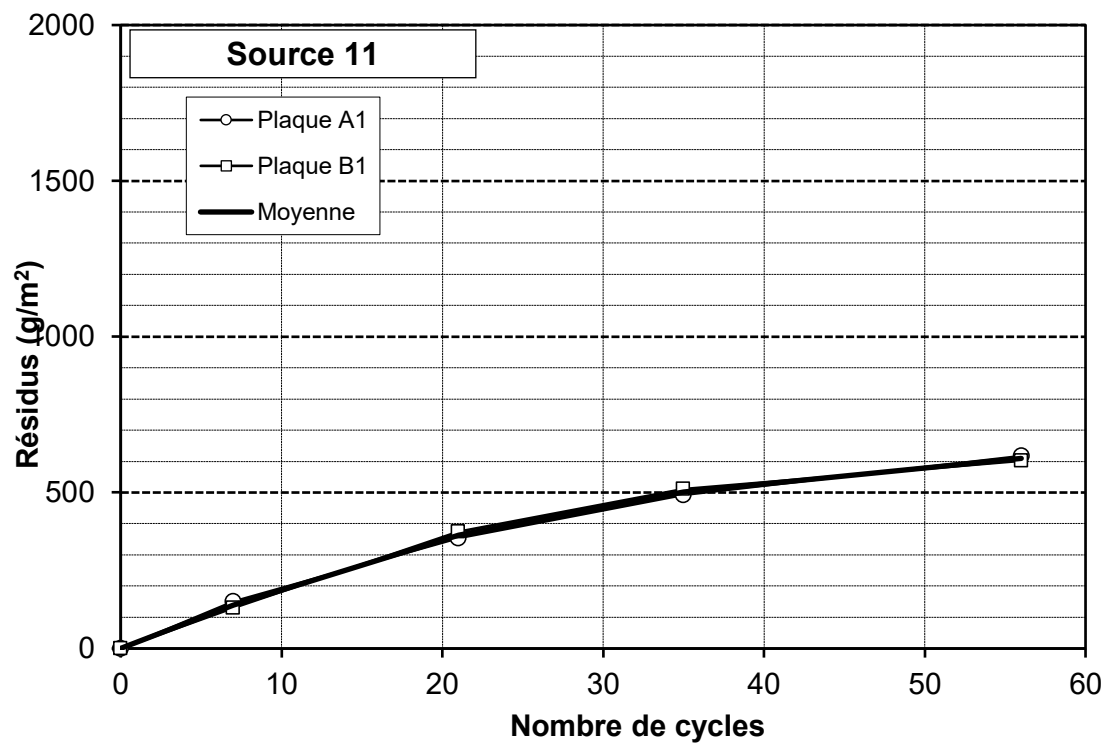




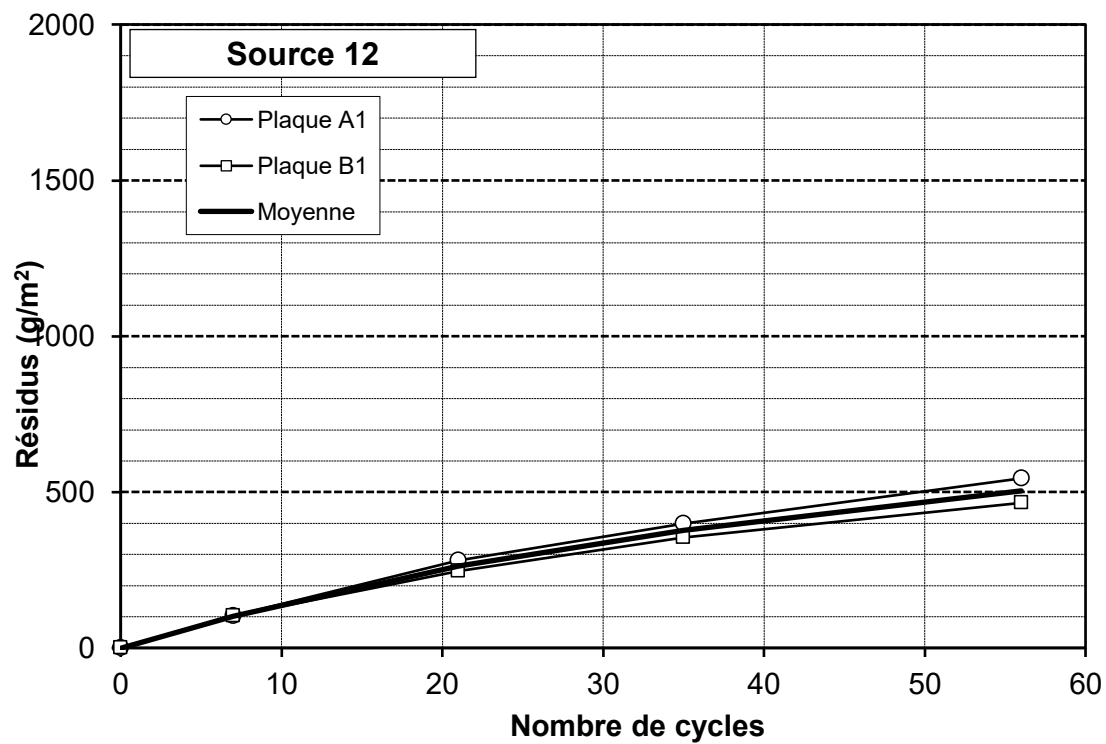
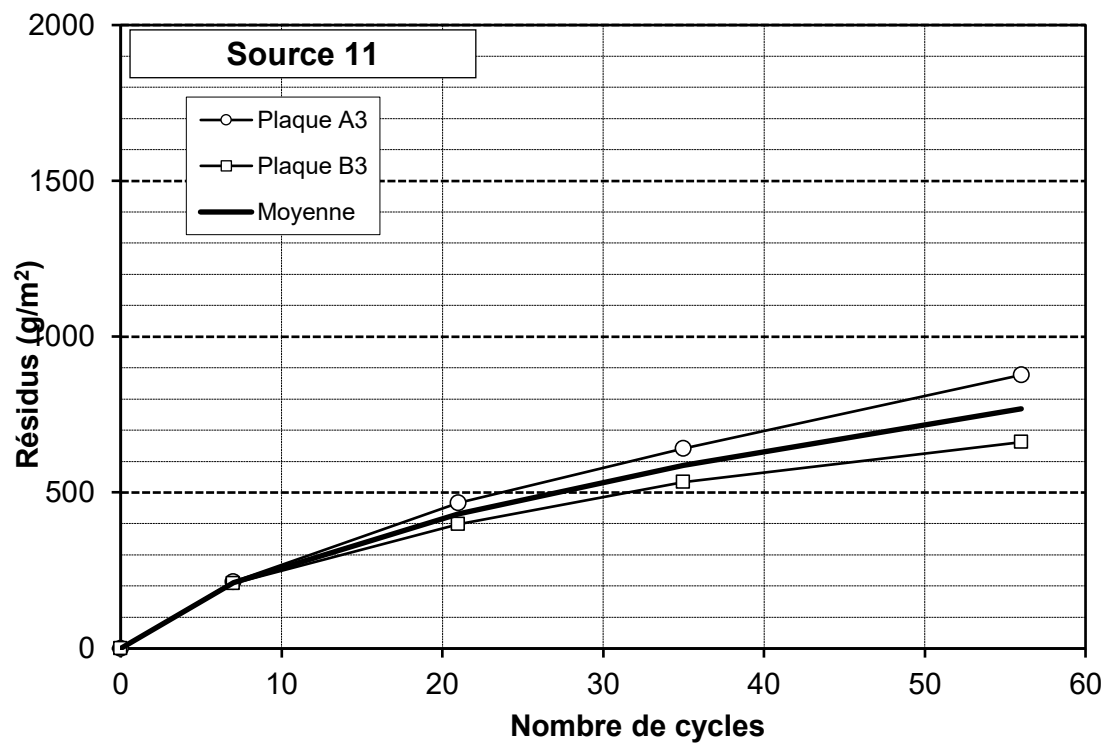


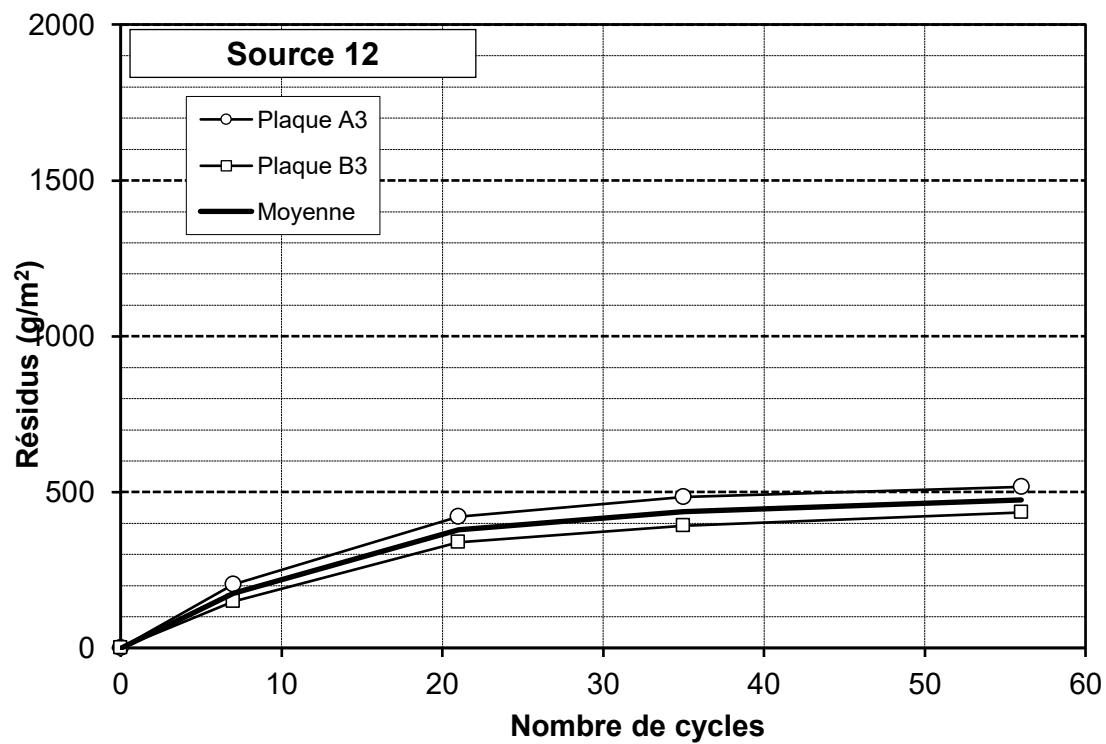
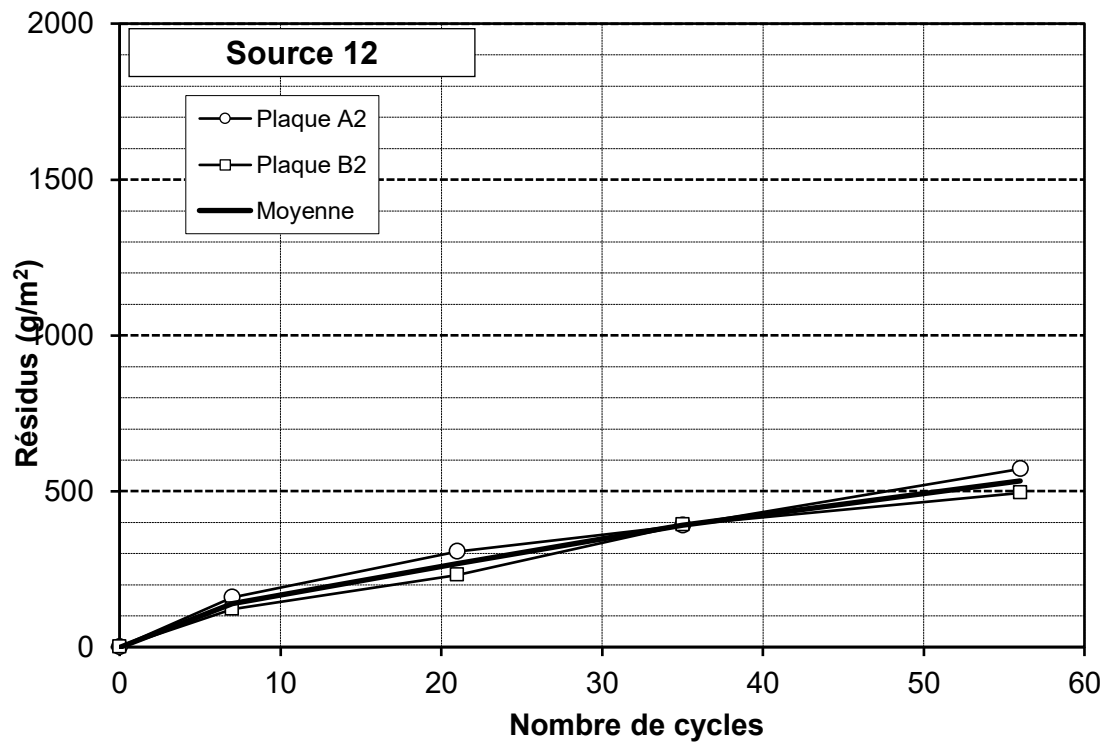


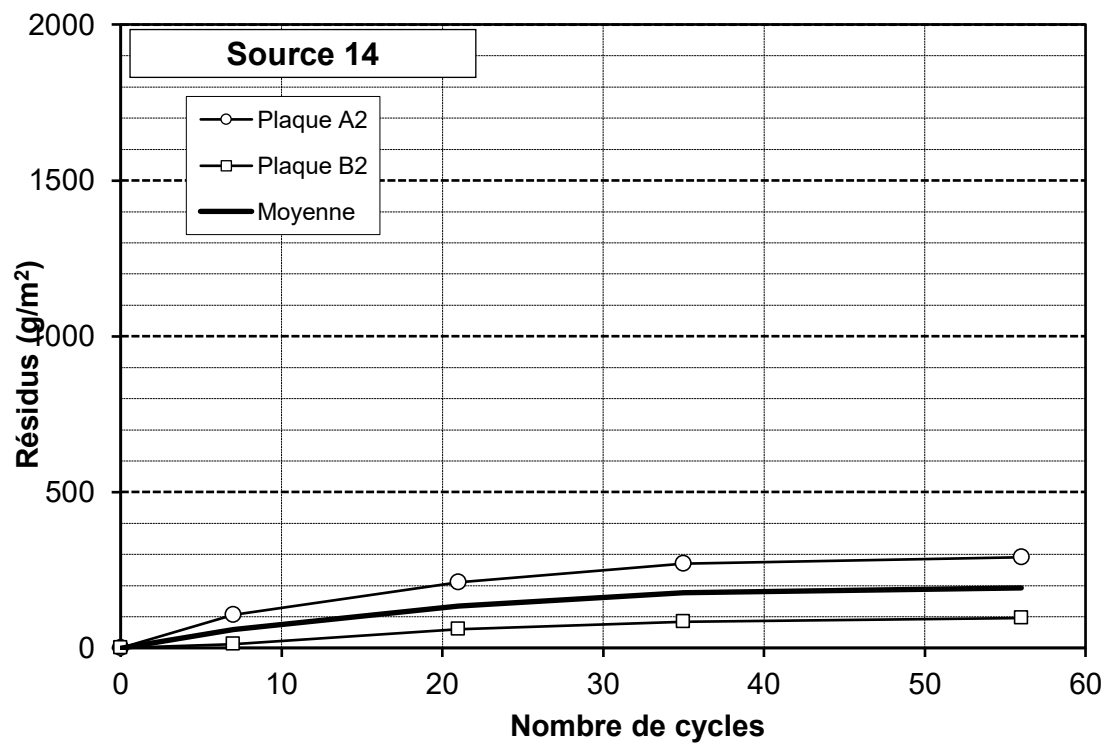
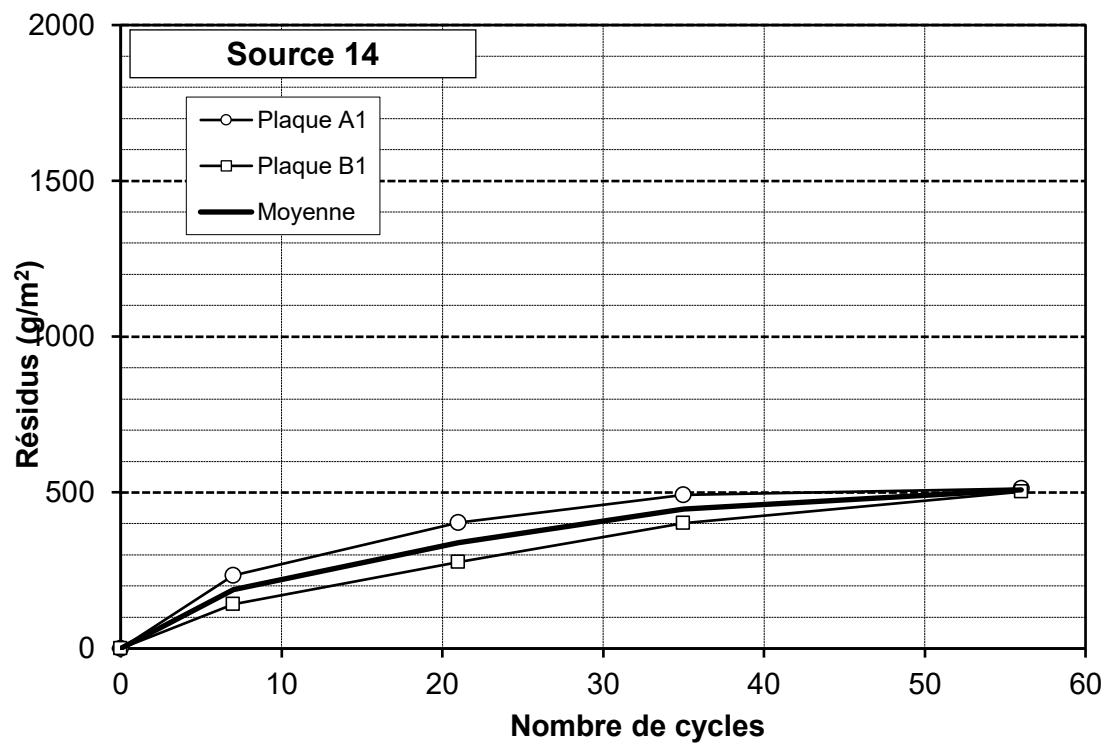


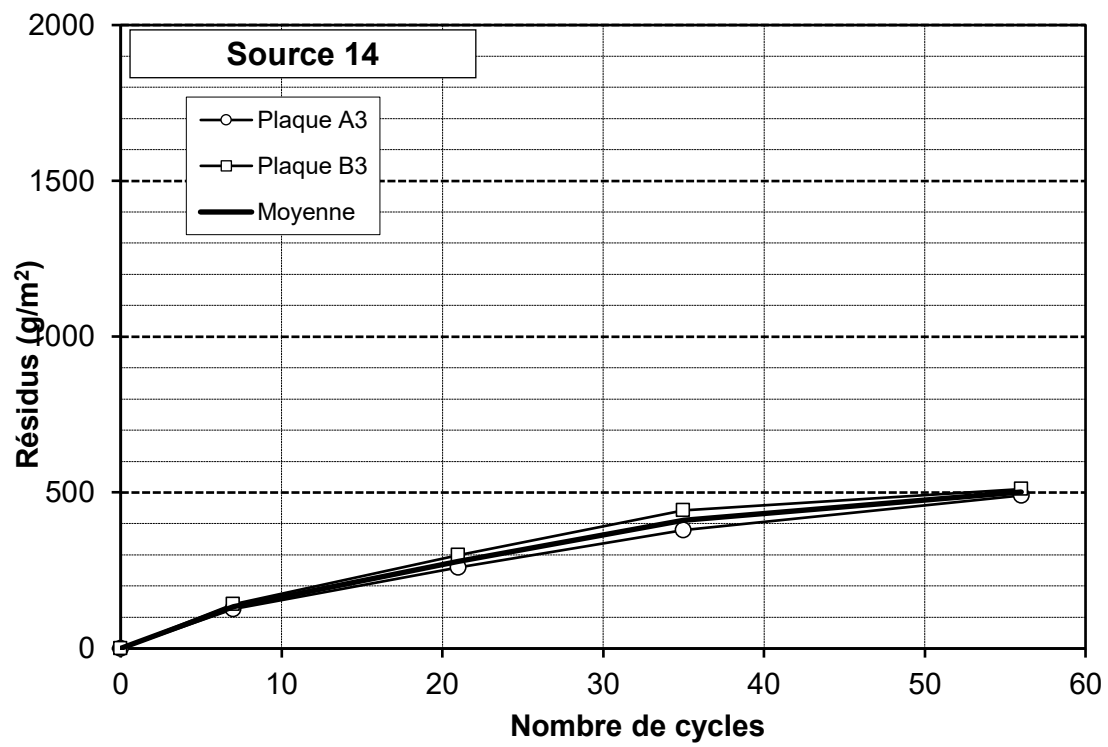










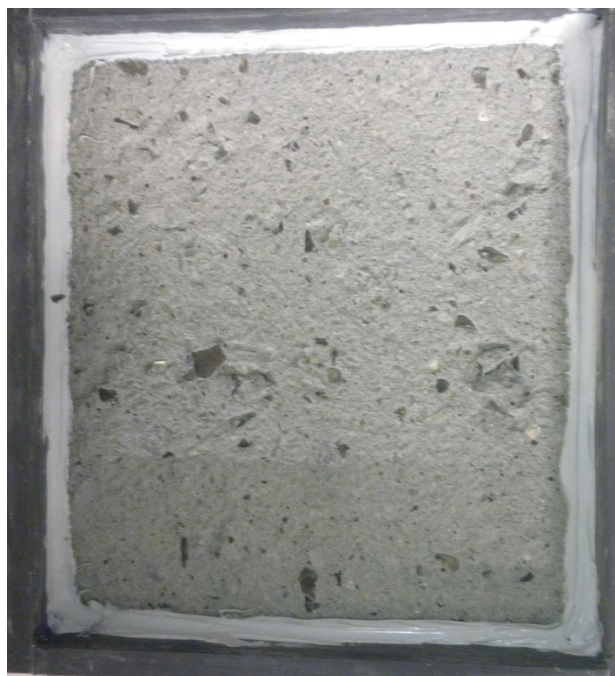




**FIGURE 9.1 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque A1**



**FIGURE 9.2 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque A2**



**FIGURE 9.3 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque B1**



**FIGURE 9.4 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque B2**



**FIGURE 9.5 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque C1**



**FIGURE 9.6 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque C2**





**FIGURE 9.7 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque A1**

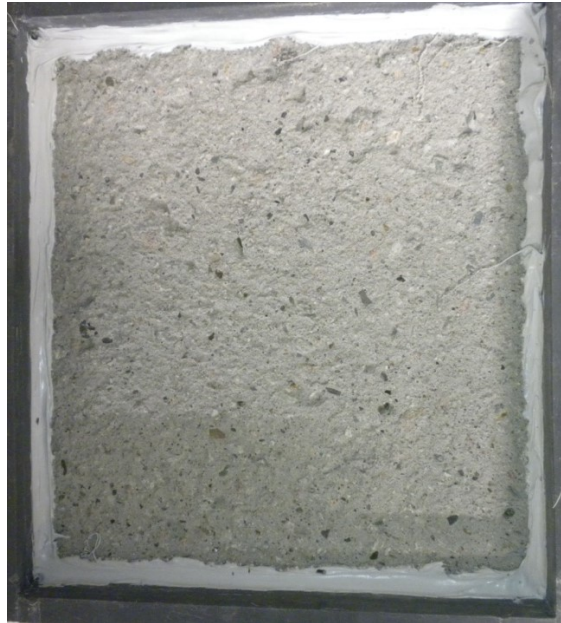


**FIGURE 9.8 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque A2**





**FIGURE 9.9 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque B1**



**FIGURE 9.10 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque B2**



**FIGURE 9.11 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque C1**



**FIGURE 9.12 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque C2**



**FIGURE 9.13 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque A1**



**FIGURE 9.14 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque A2**





**FIGURE 9.15 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque B1**



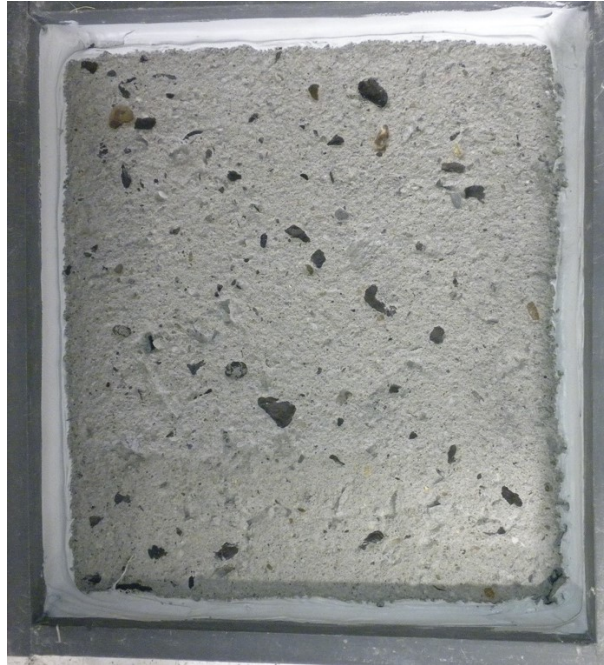
**FIGURE 9.16 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque B2**



**FIGURE 9.17 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque C1**



**FIGURE 9.18 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque C2**

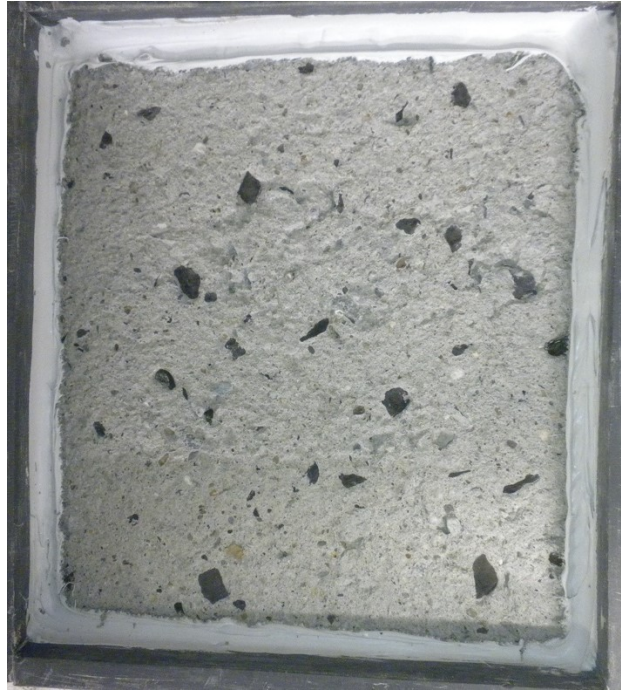


**FIGURE 9.19 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque A1**

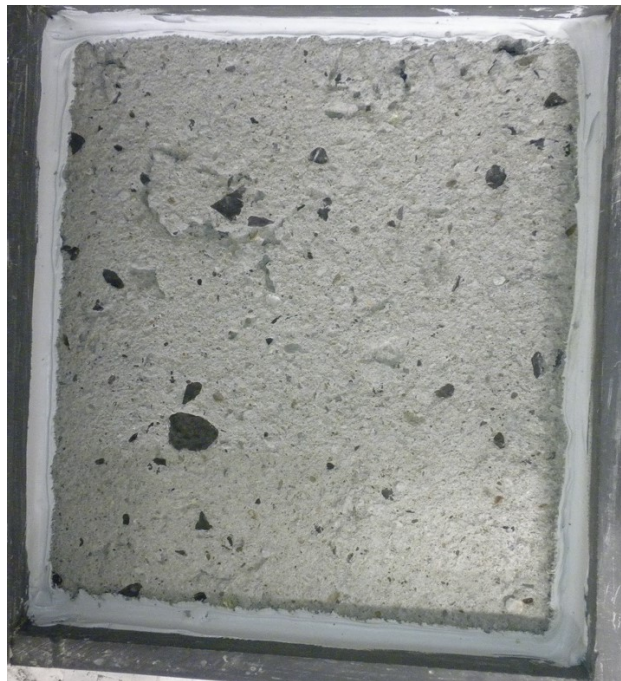


**FIGURE 9.20 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque A2**





**FIGURE 9.21 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque B1**



**FIGURE 9.22 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque B2**



**FIGURE 9.23 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque C1**



**FIGURE 9.24 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque C2**





**FIGURE 9.25 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque A1**



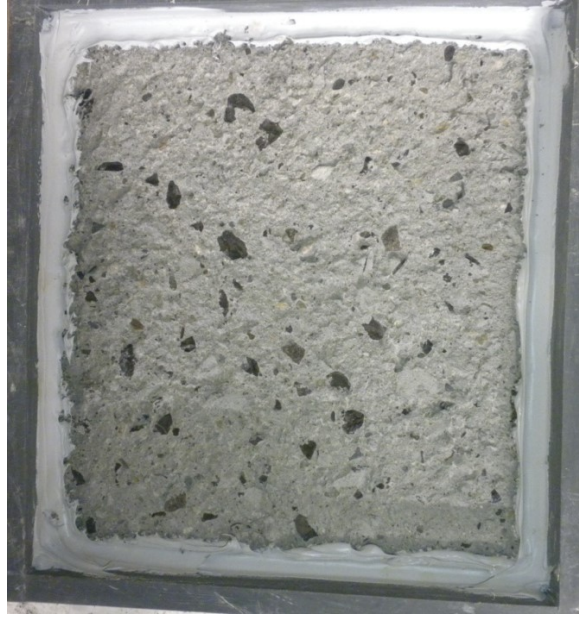
**FIGURE 9.26 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque A2**



**FIGURE 9.27 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque B1**



**FIGURE 9.28 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque B2**



**FIGURE 9.29 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque C1**



**FIGURE 9.30 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque C2**





**FIGURE 9.31 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque A1**



**FIGURE 9.32 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque A2**



**FIGURE 9.33 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque B1**



**FIGURE 9.34 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque B2**



**FIGURE 9.35 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque C1**



**FIGURE 9.36 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque C2**





**FIGURE 9.37 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque A1**



**FIGURE 9.38 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque A2**



**FIGURE 9.39 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque B1**



**FIGURE 9.40 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque B2**





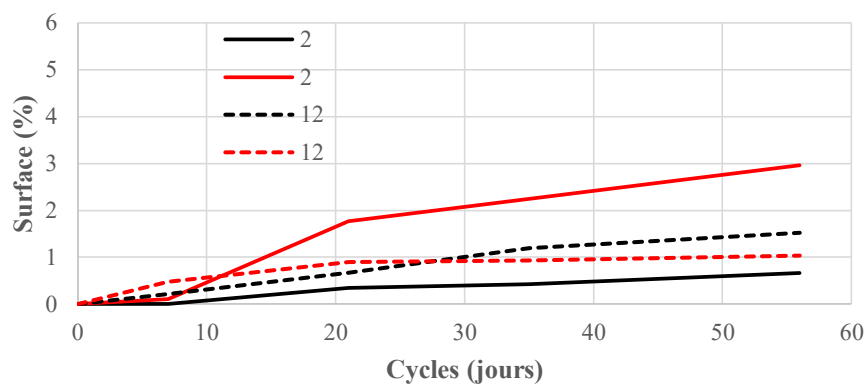
**FIGURE 9.41 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque C1**



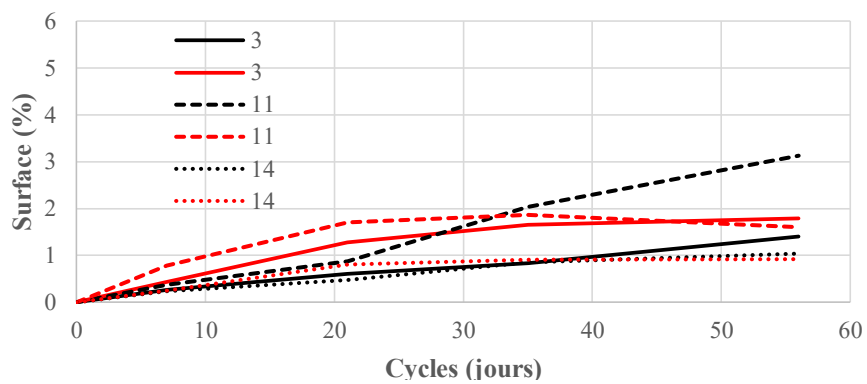
**FIGURE 9.42 - État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque C2**

# **Annexe 4 - Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 1**

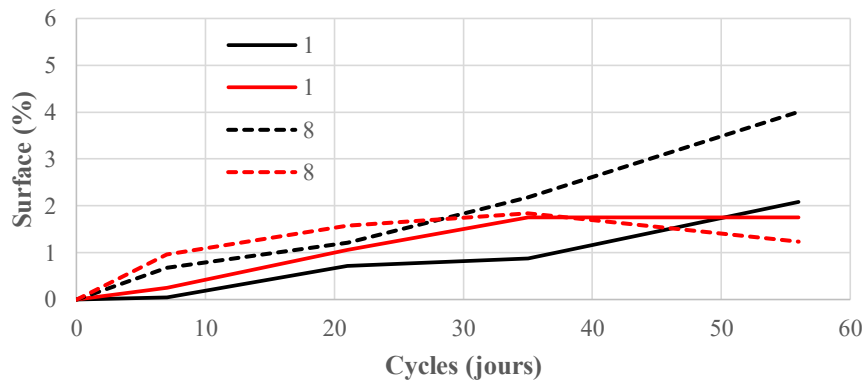
## **Catégorie 1**



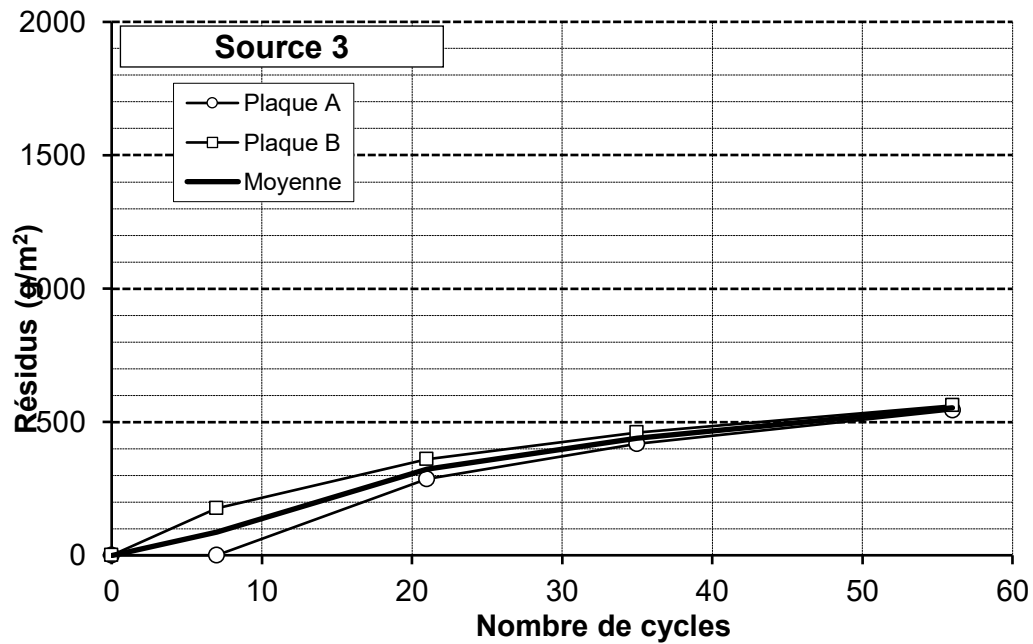
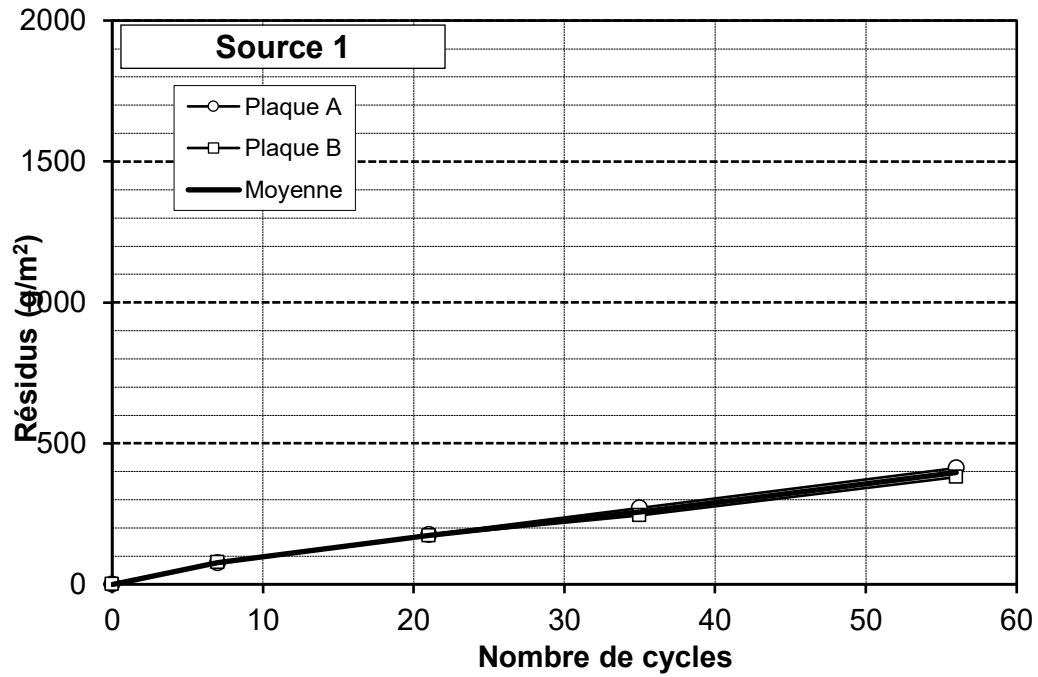
## **Catégorie 2**

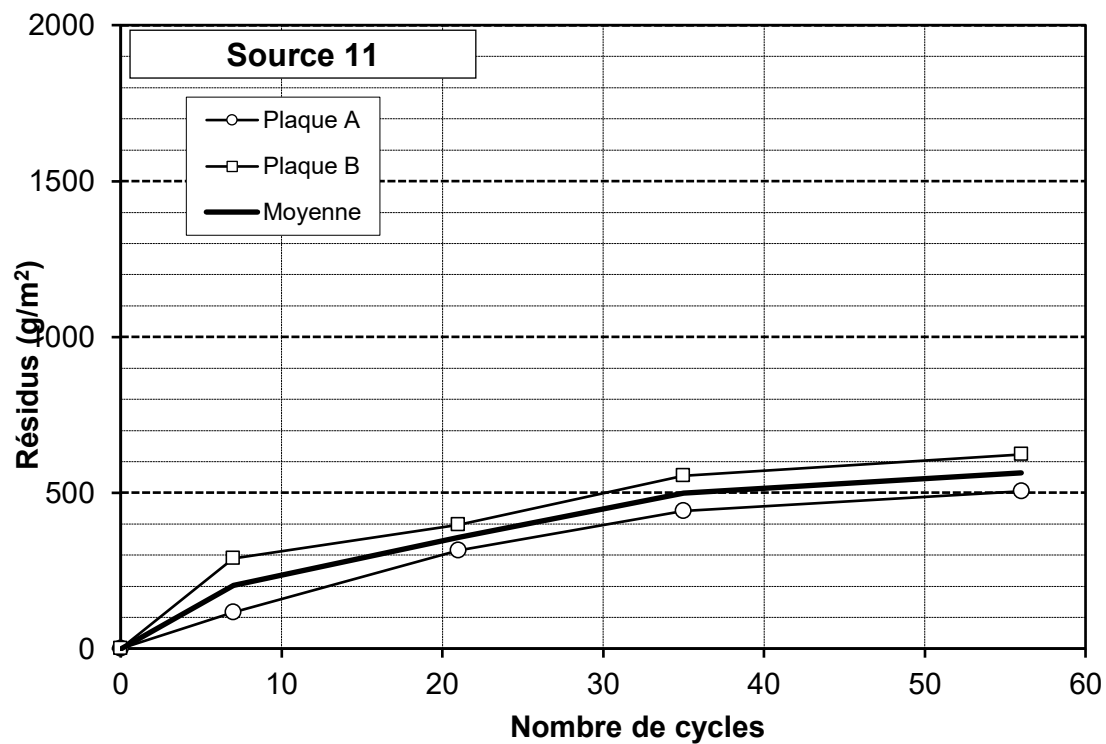
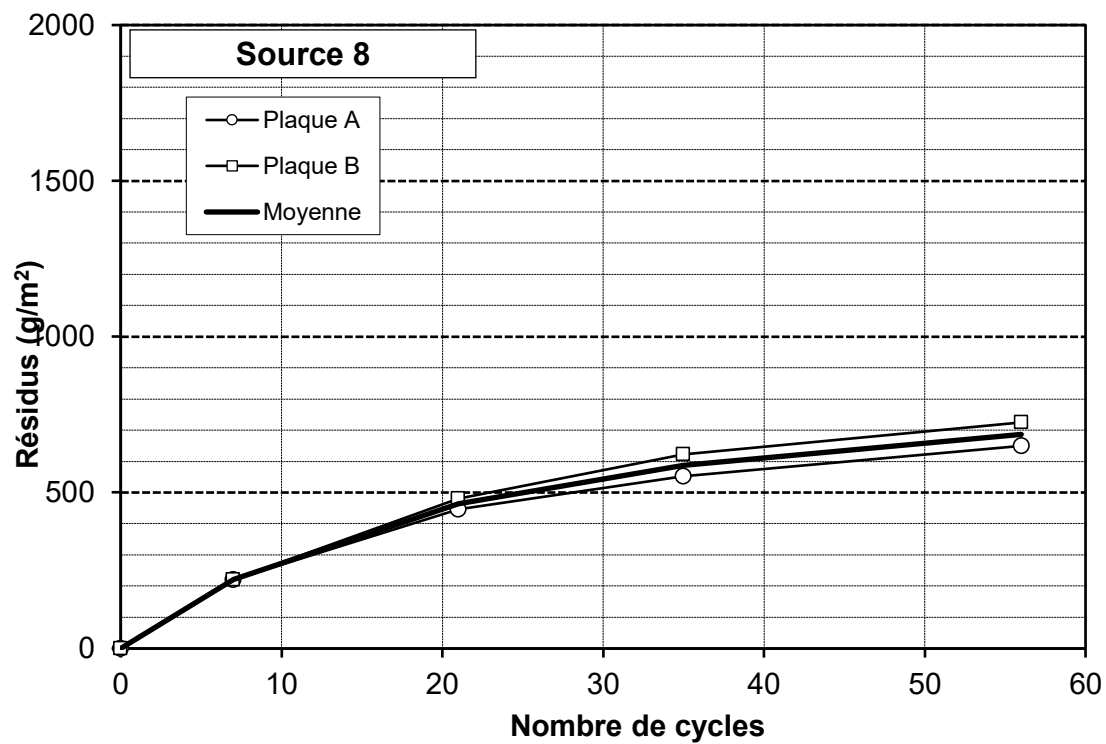


## **Catégorie 3**



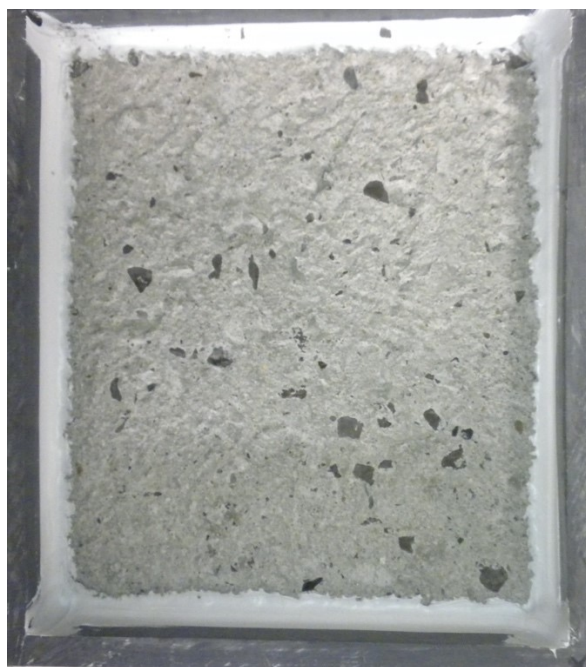
**Annexe 5 - Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 2**  
**/ État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 2**







**FIGURE 9.43 - État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 1 – plaque A**



**FIGURE 9.44 - État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 1 – plaque B**



**FIGURE 9.45 - État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 3 – plaque A**

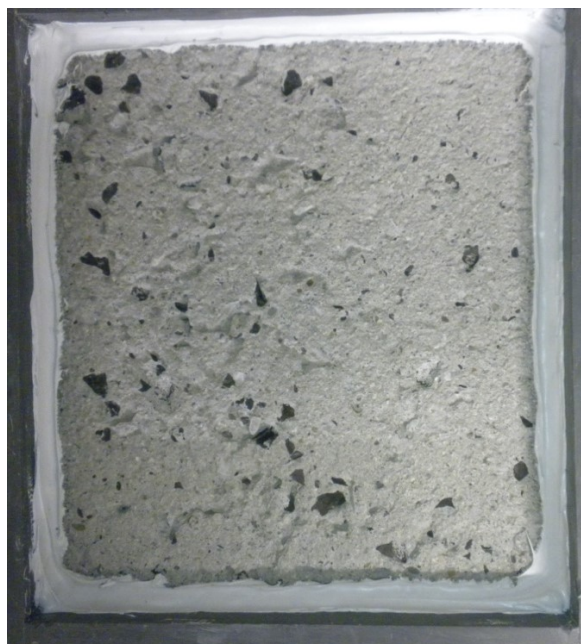


**FIGURE 9.46 - État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 3 – plaque B**





**FIGURE 9.47 - État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 8 – plaque A**



**FIGURE 9.48 - État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 8 – plaque B**



**FIGURE 9.49 - État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 11 – plaque A**

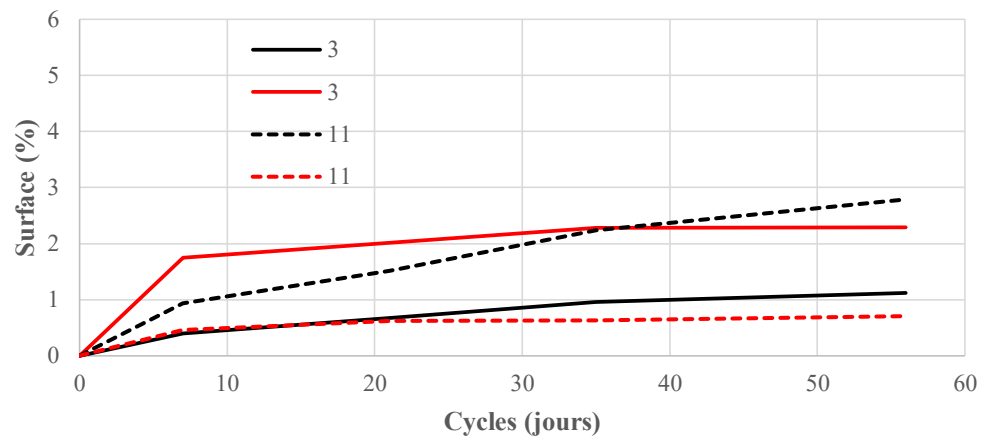


**FIGURE 9.50 - État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 11 – plaque B**

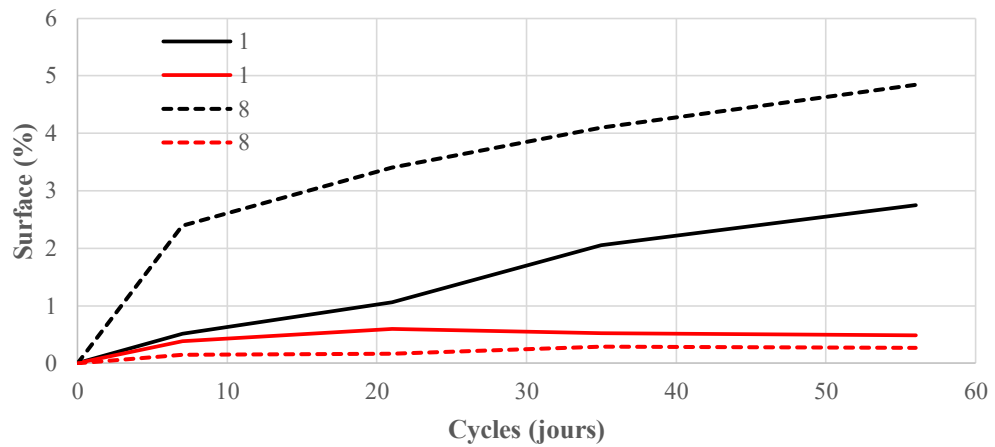


**Annexe 6 - Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 2**

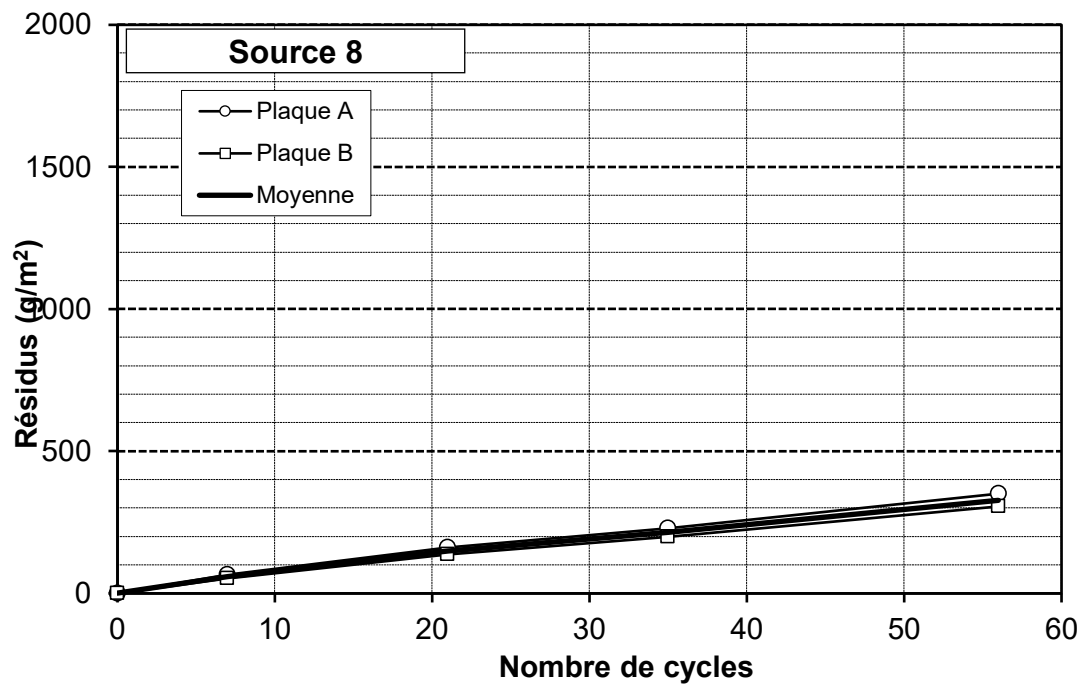
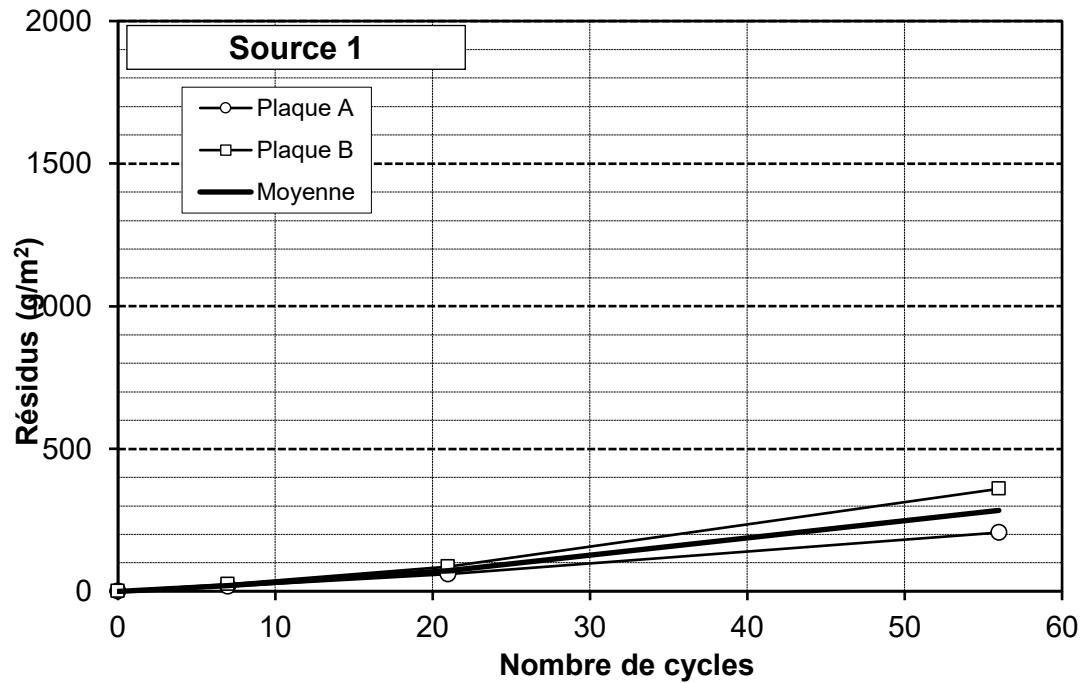
**Catégorie 2**



**Catégorie 3**



**Annexe 7 - Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 3  
/ État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 3**





**FIGURE 9.51 - État de surface à 56 cycles – phase 3 – source 1 – plaque A**



**FIGURE 9.52 - État de surface à 56 cycles – phase 3 – source 1 – plaque B**

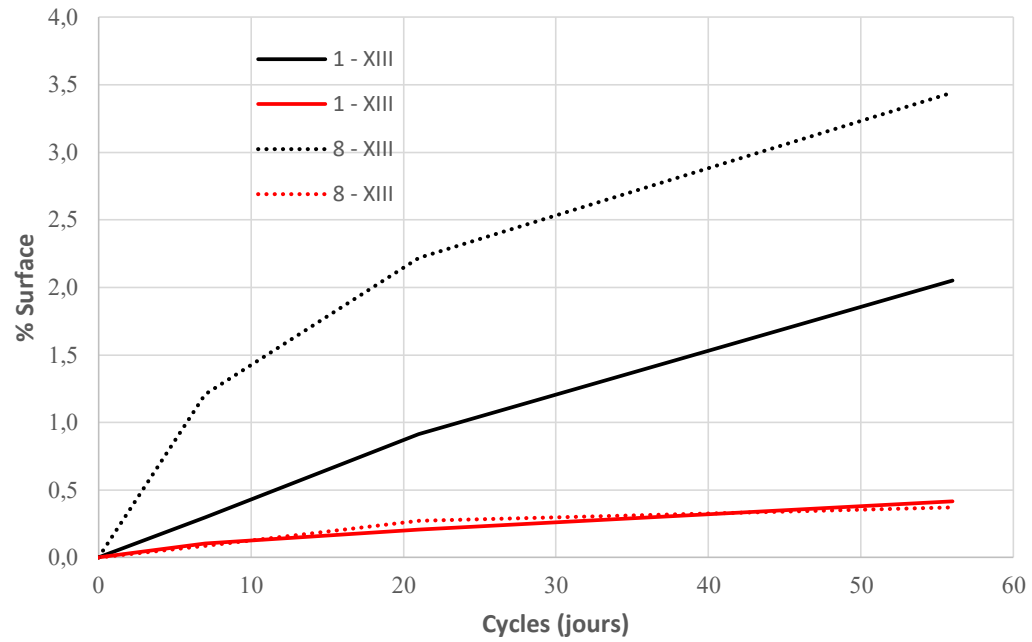


**FIGURE 9.53 - État de surface à 56 cycles – phase 3 – source 8 – plaque A**

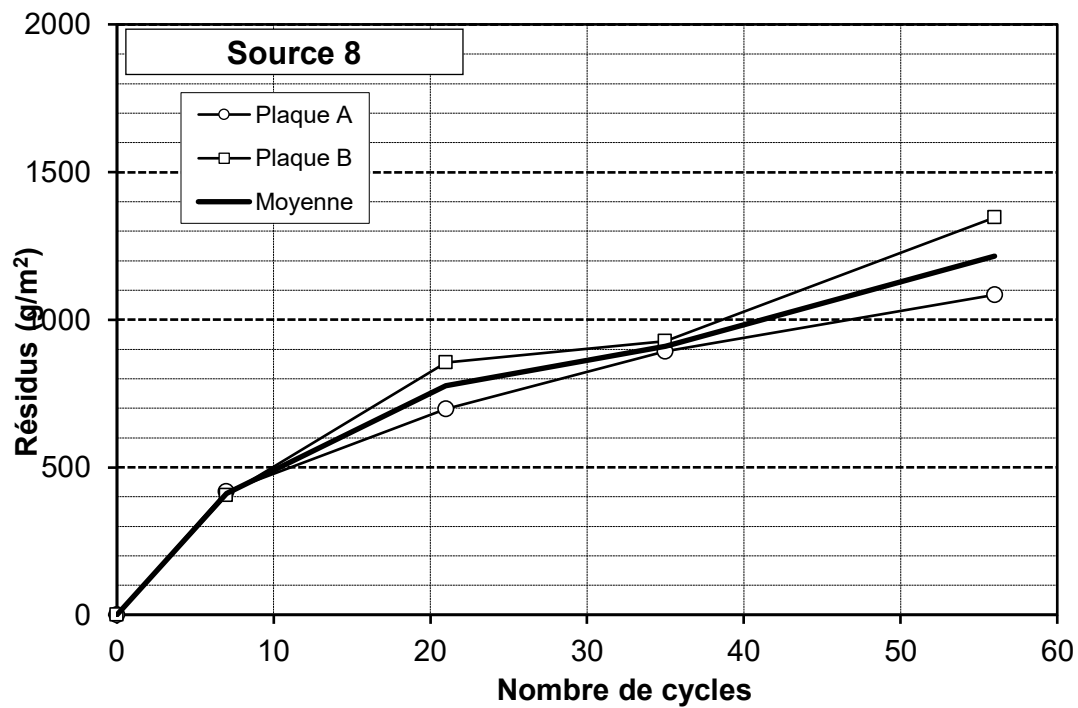
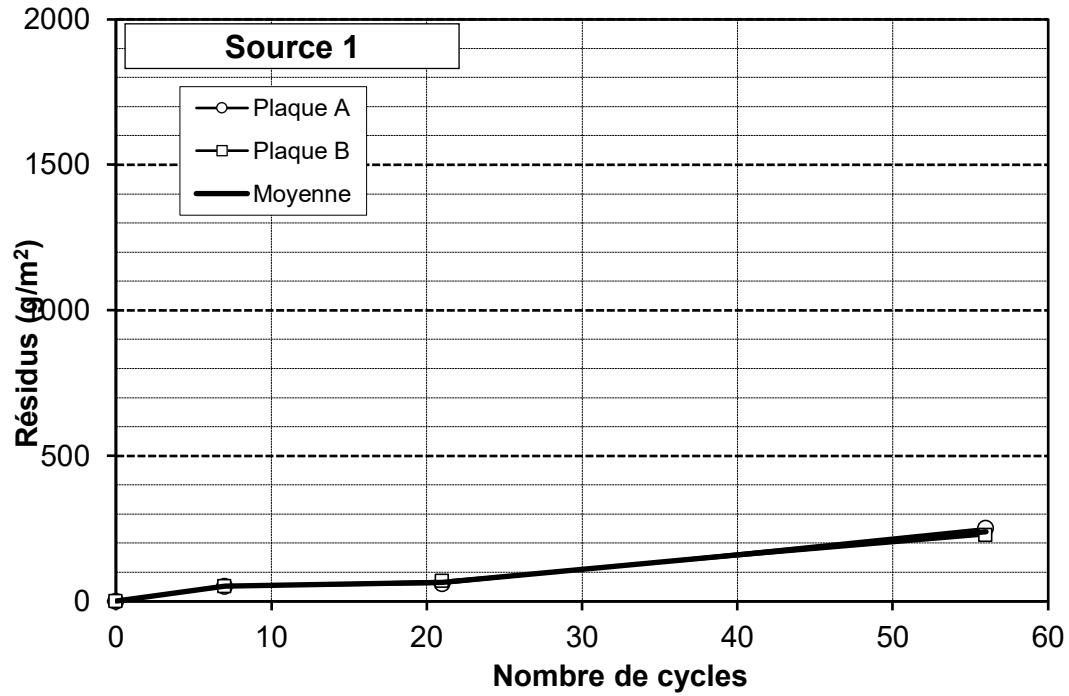


**FIGURE 9.54 - État de surface à 56 cycles – phase 3 – source 8 – plaque B**

**Annexe 8 - Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 3**



**Annexe 9 - Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 4**  
**/ État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 4**





**FIGURE 9.55 - État de surface à 56 cycles – phase 4 – source 1 – plaque A**



**FIGURE 9.56 - État de surface à 56 cycles – phase 4 – source 1 – plaque B**





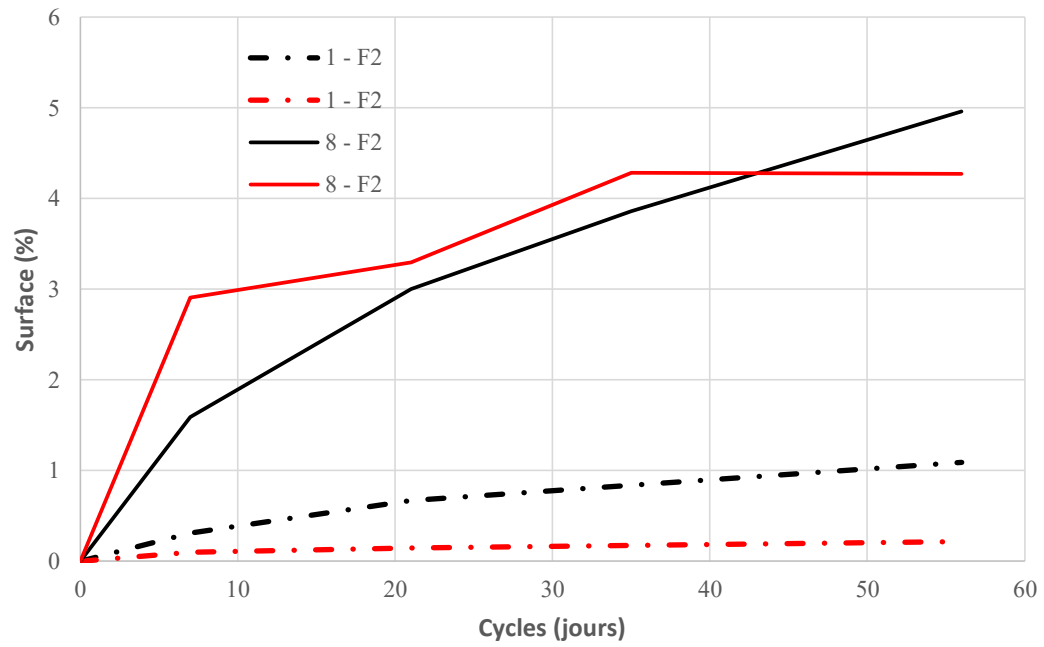
**FIGURE 9.57 - État de surface à 56 cycles – phase 4 – source 8 – plaque A**



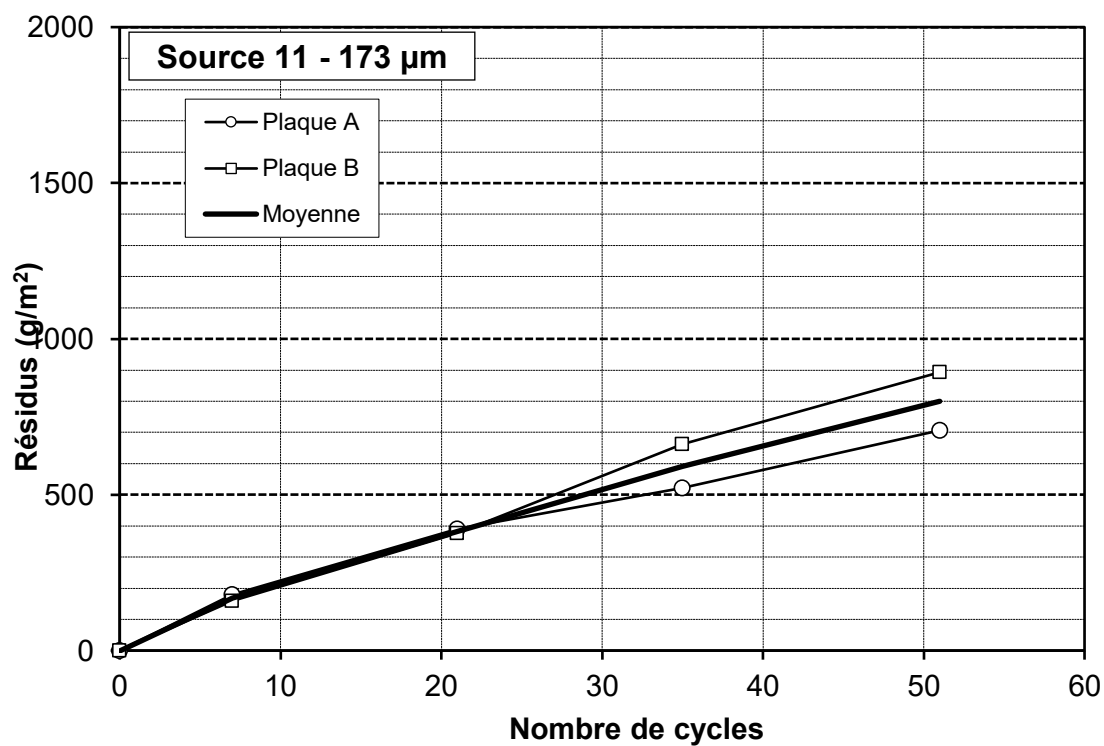
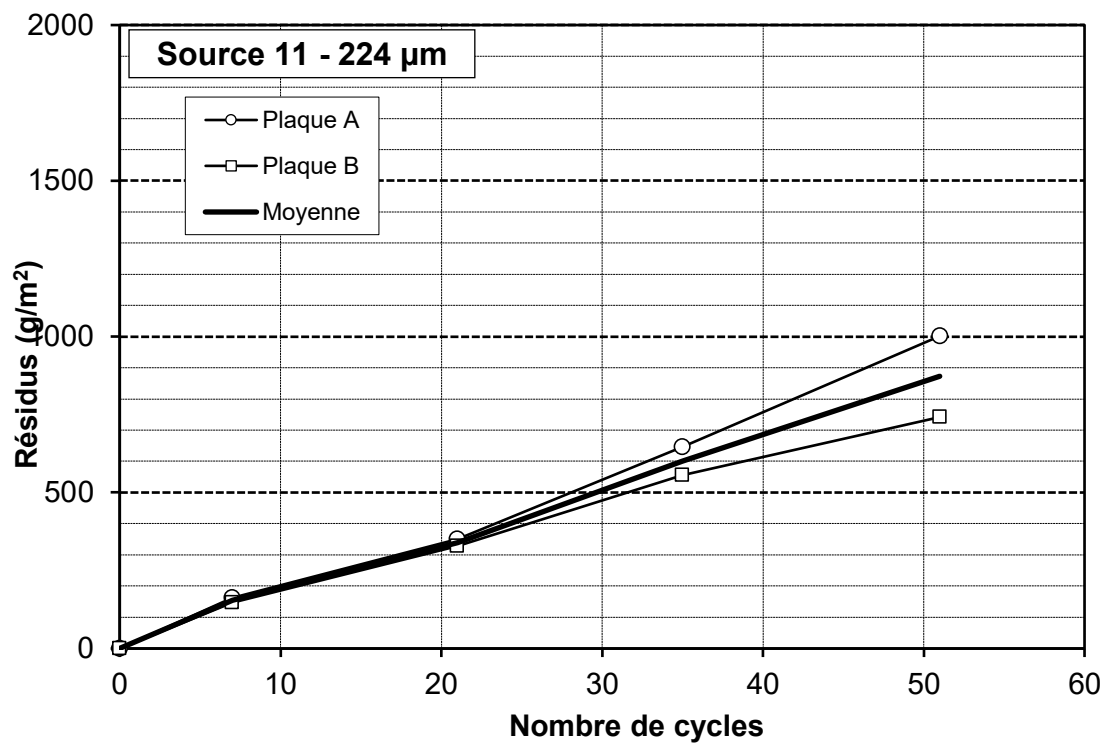
**FIGURE 9.58 - État de surface à 56 cycles – phase 4 – source 8 – plaque B**



**Annexe 10 - Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 4**



**Annexe 11 - Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 5 / État de surface des plaques d'écaillage à 51 cycles de gel-dégel de la phase 5**





**FIGURE 9.59 - État de surface à 51 cycles – phase 5 – source 11 – 224  $\mu\text{m}$  – plaque A**



**FIGURE 9.60 - État de surface à 51 cycles – phase 5 – source 11 – 224  $\mu\text{m}$  – plaque B**

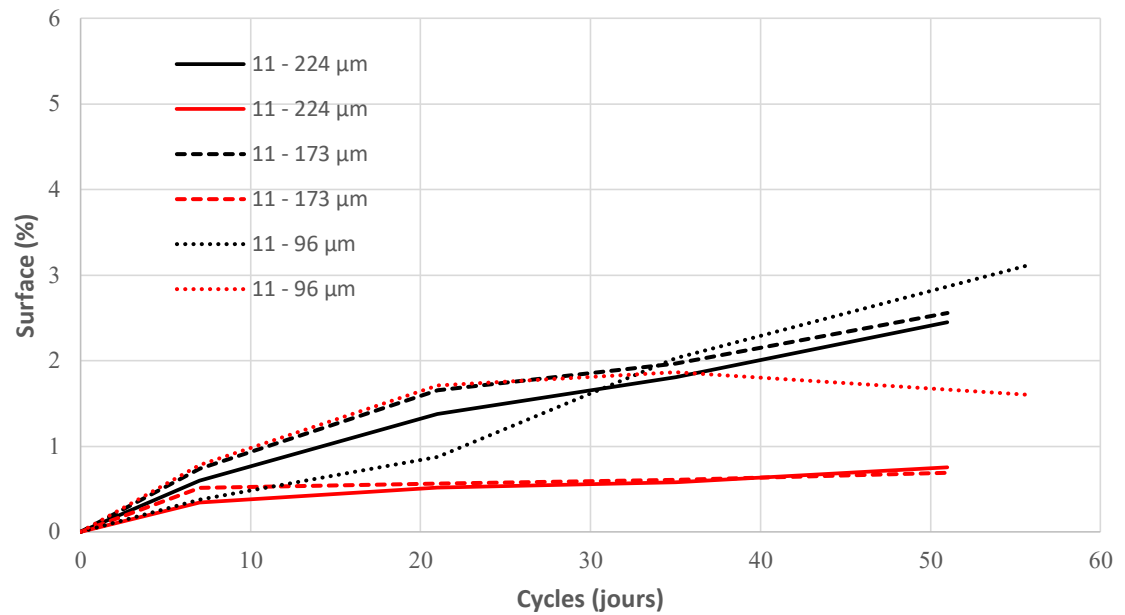


**FIGURE 9.61 - État de surface à 51 cycles – phase 5 – source 11 – 173  $\mu\text{m}$  – plaque A**

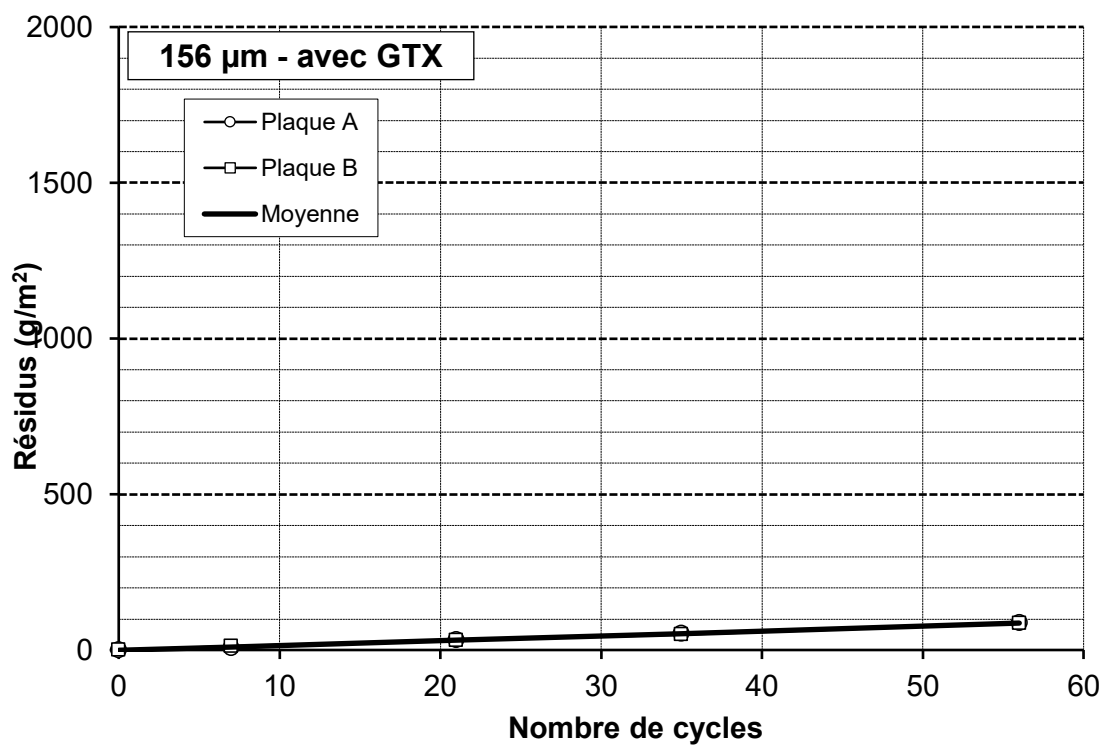
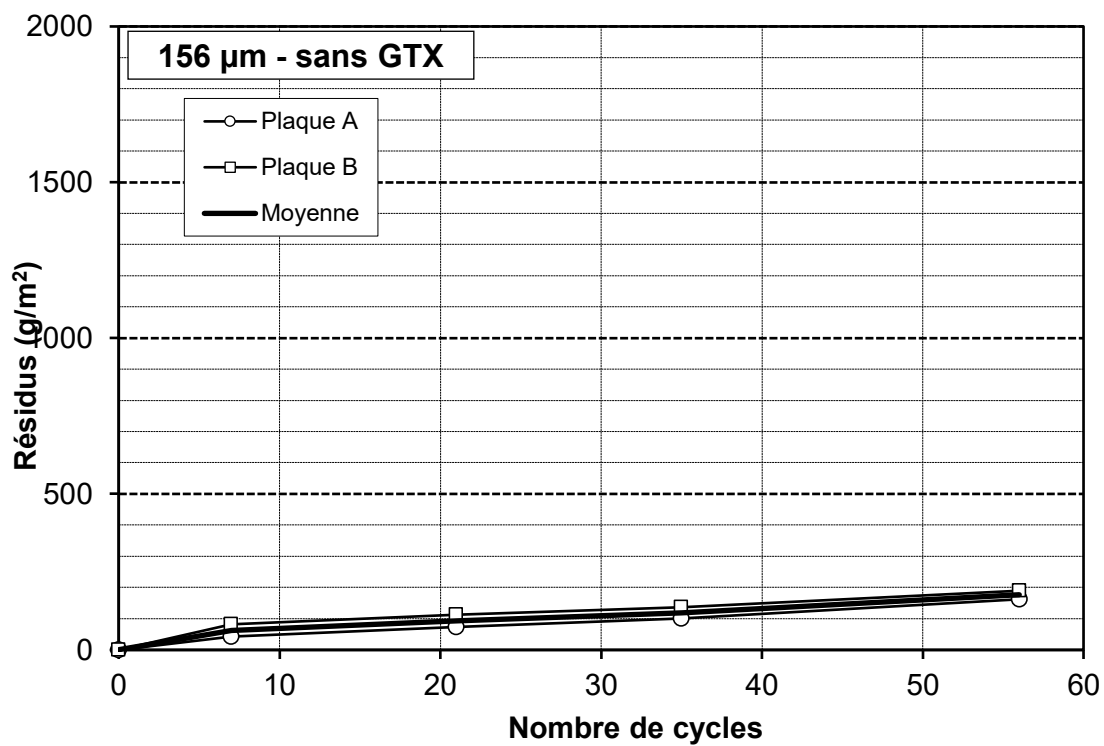


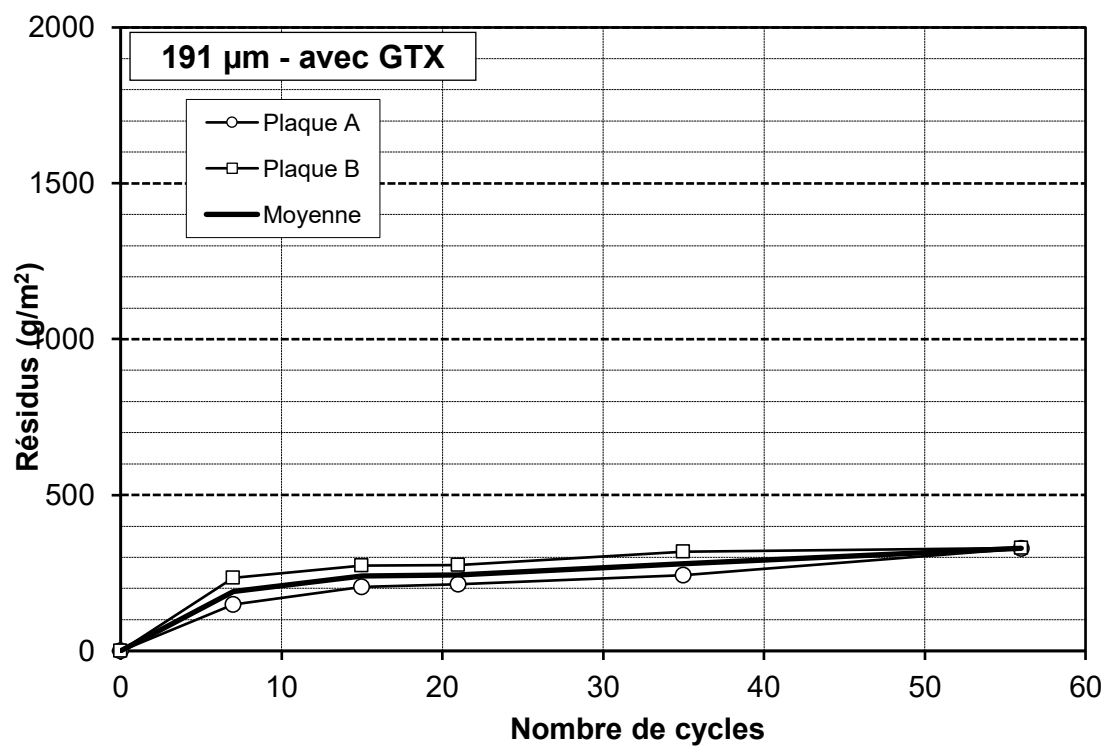
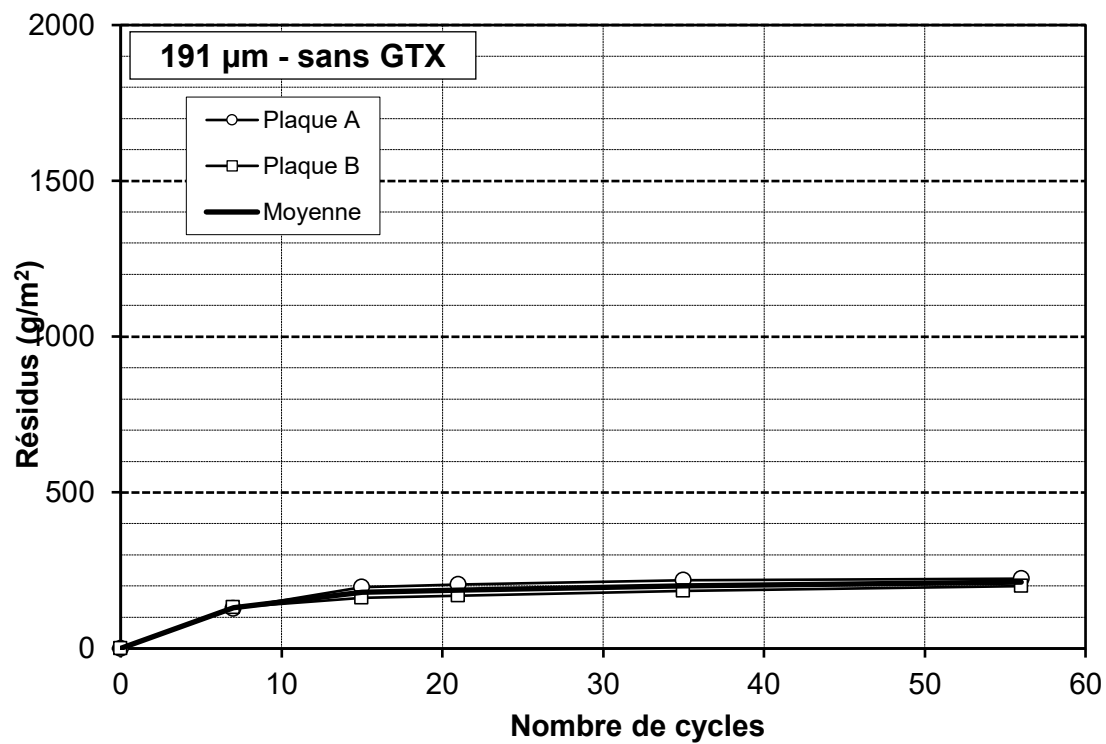
**FIGURE 9.62 - État de surface à 51 cycles – phase 5 – source 11 – 173  $\mu\text{m}$  – plaque B**

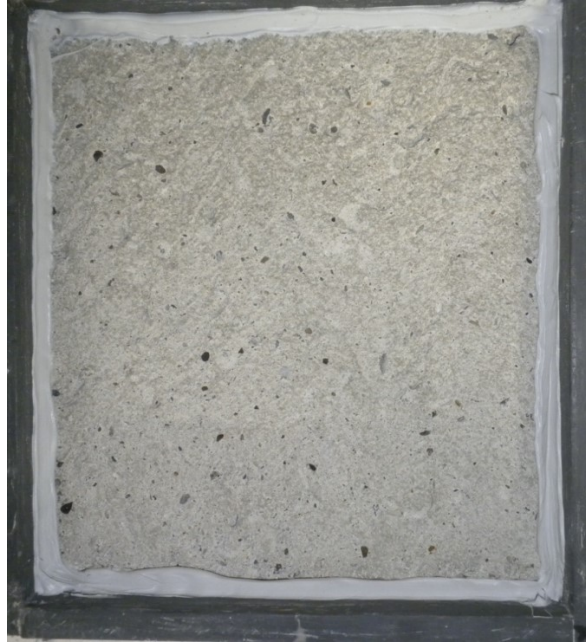
**Annexe 12 - Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 5**



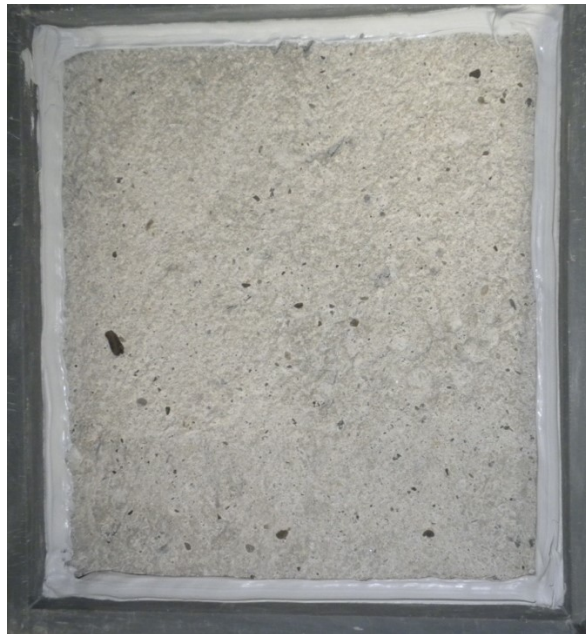
**Annexe 13 - Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 6 / État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 6**







**FIGURE 9.63 - État de surface à 56 cycles – phase 6 - sans géotextile – 230  $\mu\text{m}$  – plaque A**

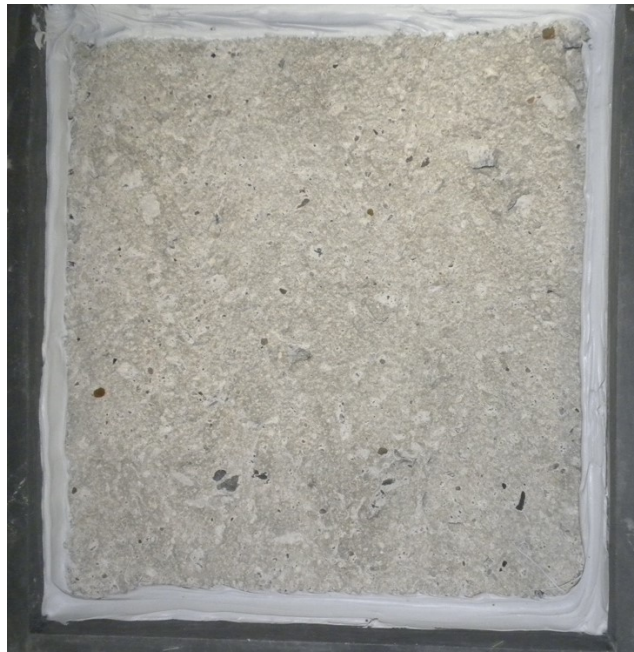


**FIGURE 9.64 - État de surface à 56 cycles – phase 6 - sans géotextile – 230  $\mu\text{m}$  – plaque B**





**FIGURE 9.65 - État de surface à 56 cycles – phase 6 - avec géotextile – 230  $\mu\text{m}$  – plaque A**



**FIGURE 9.66 - État de surface à 56 cycles – phase 6 - avec géotextile – 230  $\mu\text{m}$  – plaque B**



**FIGURE 9.67 - État de surface à 56 cycles – phase 6 - sans géotextile – 191  $\mu\text{m}$  – plaque A**



**FIGURE 9.68 - État de surface à 56 cycles – phase 6 - sans géotextile – 191  $\mu\text{m}$  – plaque B**



**FIGURE 9.69 - État de surface à 56 cycles – phase 6 - avec géotextile – 191  $\mu\text{m}$  – plaque A**



**FIGURE 9.70 - État de surface à 56 cycles – phase 6 - avec géotextile – 191  $\mu\text{m}$  – plaque B**

## Annexe 14 - Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 6

